

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE
M. ING.

PAR
ISABELLE BONGO

DÉTECTION DE SIGNAUX RADAR
ET ESTIMATION DE LEURS TEMPS D'ARRIVÉE

MONTREAL, 19 JUIN 2000

©Droits réservés d'Isabelle Bongo

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ PAR UN JURY COMPOSÉ DE:

- ◆ M. Claude Thibeault, professeur-tuteur
Département de génie électrique, École de technologie supérieure
- ◆ M. François Gagnon, professeur-cotuteur
Département de génie électrique, École de technologie supérieure
- ◆ M. Christian Gargour, professeur
Département de génie électrique, École de technologie supérieure
- ◆ M. Pierre Lavoie, professeur
Département de génie électrique, École polytechnique de Montréal

IL A FAIT L'OBJET D'UNE PRÉSENTATION DEVANT CE JURY ET UN PUBLIC
LE 20 AVRIL 2000
À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

DÉTECTION DE SIGNAUX RADAR ET ESTIMATION DE LEURS TEMPS D'ARRIVÉE

Isabelle BONGO
(Sommaire)

Ces dernières années, une grande attention s'est portée sur la reconnaissance de la forme d'onde du signal de retour dans les radars modernes à cause de leur pertinence. Cependant, les formes d'onde des signaux de retour étant déformées par le bruit du système, des erreurs sont commises lors de leur détection et estimation. Notre travail consiste à concevoir un circuit numérique de détection des impulsions et de calcul de leurs temps d'arrivée et de leurs largeurs, qui minimise ces erreurs. Ce circuit doit fonctionner à 50 MHz avec une latence maximale de 10 périodes d'horloge au détecteur.

Ce rapport propose un algorithme de détection et d'estimation des impulsions. La détection consiste à comparer l'amplitude des échantillons du front montant à un seuil $TH1$ et à déclarer l'impulsion valide dès qu'un nombre $MH+1$ d'échantillons successifs d'amplitudes supérieures à $TH1$ sont détectés. Suite à une validation d'impulsion, la fin de celle-ci est déclarée dès la détection du premier échantillon inférieur à un deuxième seuil $TH2$. Le temps d'arrivée ($PTAI$) de l'impulsion est estimé être le temps correspondant à un certain seuil (PTH). Ce seuil représente sa demi amplitude sur une échelle linéaire. Le signal traité étant numérique, $PTAI$ est déterminé par interpolation. Après une étude théorique de plusieurs méthodes d'interpolation, la méthode d'interpolation linéaire a été sélectionnée pour l'estimation du $PTAI$ vu son rapport précision/coût matériel très avantageux. Afin d'alléger encore le coût de cette méthode en évitant une opération de division, nous avons subdivisé l'intervalle des 2 points encadrant PTH (ceux qui servent à l'interpolation) en 16 sous intervalles. L'abscisse du premier point de sous intervalle d'amplitude supérieure à PTH correspond au $PTAI$. La largeur d'impulsion est le nombre de périodes d'horloge entre le premier échantillon au-dessus de $TH1$ et le premier en dessous de $TH2$.

L'entrée schématique de cet algorithme a été réalisée sur Viewlogic. La synthèse du circuit résultant nous donne une fréquence maximale de 57 MHz avec des latences maximales de 5 périodes d'horloge pour le détecteur et de 14 pour le circuit total. Ces résultats remplissent bien toutes les contraintes imposées au circuit. L'implantation du circuit sur FPGA nous a également permis de vérifier toute la logique adoptée et d'obtenir de bons résultats de détection et d'estimation des signaux.

PULSE RADAR DETECTION AND ESTIMATION OF THEIR TIMES OF ARRIVAL

Isabelle BONGO
(Abstract)

In recent year, considerable attention has been paid to waveform recognition techniques because of their suitability. However, signal returns are contaminated by the system noise and cause bad processes of detection and estimation. This work consists of designing a digital circuit for pulse detection and parameters estimation. The parameters are the pulse width and time of arrival. The circuit must run at 50 MHz frequency and have 10 clock periods of maximum latency in its detection circuit.

In this paper a detection and estimation algorithm is proposed to process pulses with minimum error due to noise. The detection consists of comparing samples on the rising edge to a $TH1$ threshold and to declare the pulse valid as soon as a number $MH+1$ of successive samples whose amplitudes are higher than $TH1$ are detected. After a pulse validation, its end is declared by the first sample lower than $TH2$. The pulse time of arrival ($PTAO$) is supposed to be the time where the pulse amplitude corresponds to a threshold PTH . This threshold represents half the pulse amplitude on a linear scale. Since signals are numeric, this time must be determined by interpolation. We made theoretical studies of many of them. Finally, we chose the linear interpolation because it gives satisfying results in precision and hardware cost. To simplify this method by avoiding a division, we use an approximation method by subdividing the interval of the two points around the threshold (those used by the linear interpolation) in 16 sub-intervals. The amplitudes of those corresponding points are compared to the threshold PTH . The abscissa of the first one above PTH corresponds to $PTAO$. The pulse width is the time between the first sample above $TH1$ and the first one below $TH2$.

The schematic entry of this algorithm was made on Viewlogic. The synthesis of the result circuit gave us a maximum clock frequency of 57 MHz with maximum latencies of 5 clock periods for the detector and 14 clock periods for the global circuit. These results meet all imposed constraints. The implementation of this circuit on a FPGA allowed verifying the adopted logic and gave satisfying results of signals detection and estimation.

REMERCIEMENTS

Je dédie ce mémoire à ma mère Rose Didia et à mon père Joseph Bongo pour leur soutien financier et moral qui m'a permis de mener à bien mes études supérieures au Canada.

Je remercie tous les membres de ma famille, mes amis et collègues du LACIME qui ont toujours su m'encourager.

Je témoigne toute ma reconnaissance envers mon directeur Claude Thibeault et mon codirecteur François Gagnon pour la qualité de leur encadrement et leur disponibilité.

Enfin, j'exprime toute ma reconnaissance envers mon Dieu tout puissant de m'avoir donné l'intelligence et la force nécessaires pour la réalisation de ce projet.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|--|------|
| Sommaire..... | i |
| Abstract..... | ii |
| Remerciements..... | iii |
| Liste des tableaux..... | vii |
| Liste des figures..... | viii |
| Liste des abréviations..... | x |
| Introduction..... | 1 |
| Historique..... | 1 |
| Objectifs..... | 3 |
| Détection et estimation de PTAI dans un système radar..... | 4 |
| Contributions..... | 5 |
| Contenu du rapport..... | 5 |
| CHAPITRE 1: Principes de détection et estimation..... | 6 |
| 1.1 Introduction..... | 6 |
| 1.2 La détection..... | 6 |
| 1.2.1 Type de problème de détection..... | 7 |
| 1.2.2 Principes et probabilités de détection..... | 7 |
| 1.2.3 Techniques de détection dans un système radar..... | 12 |
| 1.2.3.1 Détection par intégration..... | 12 |
| 1.2.3.2 Détection à impulsion unique..... | 14 |

| | |
|---|----|
| 1.3 Estimation d'une impulsion radar..... | 14 |
| 1.3.1 Théorie d'estimation du signal..... | 14 |
| 1.3.2 Techniques d'estimation et influence du bruit..... | 15 |
| 1.4 Conclusion..... | 16 |
| CHAPITRE 2 : Description des blocs fonctionnels du circuit..... | 17 |
| 2.1 Introduction..... | 17 |
| 2.2 Principes de décision du détecteur/estimateur..... | 17 |
| 2.3 Description générale de l'environnement du circuit..... | 19 |
| 2.4 Le détecteur d'impulsions..... | 20 |
| 2.4.1 Signaux et paramètres de détection..... | 21 |
| 2.4.2 Fonctionnement du détecteur..... | 24 |
| 2.5 L'estimateur..... | 24 |
| 2.5.1 Paramètres à estimer | 25 |
| 2.5.2 Fonctionnement de l'estimateur..... | 26 |
| 2.5.3 Méthodes d'interpolation et performances théoriques..... | 26 |
| 2.5.3.1 Définitions des méthodes..... | 27 |
| 2.5.3.2 Résultats théoriques des méthodes..... | 30 |
| 2.6 Conclusion..... | 37 |
| CHAPITRE 3 : Conception du circuit sur Viewlogic..... | 38 |
| 3.1 Introduction..... | 38 |
| 3.2 Technologie utilisée..... | 39 |
| 3.3 Signatures des signaux et contraintes du circuit..... | 39 |
| 3.4 Description des blocs fonctionnels du circuit..... | 40 |
| 3.4.1 Détecteur..... | 41 |
| 3.4.1.1 Détecte_Début&Validation..... | 41 |
| 3.4.1.2 Détecte_Max..... | 41 |
| 3.4.1.3 Générateur_Gain..... | 42 |
| 3.4.1.4 Détecte_Fin..... | 42 |

| | |
|---|----|
| 3.4.2 Estimateur..... | 43 |
| 3.4.2.1 Hi_Seuil..... | 43 |
| 3.4.2.2 SupSeuil..... | 44 |
| 3.4.2.3 Détecte Y0&Y1..... | 44 |
| 3.4.2.4 Li_Seuil..... | 45 |
| 3.4.2.5 PTAI..... | 46 |
| 3.4.2.6 PLargeur..... | 46 |
| 3.5 Simulations..... | 47 |
| 3.6 Mise en œuvre du circuit..... | 56 |
| 3.6.1 Choix du FPGA | 56 |
| 3.6.2 Processus de mise en œuvre..... | 57 |
| 3.7 Conclusion..... | 58 |
| Conclusion..... | 59 |
| BIBLIOGRAPHIE | 61 |
| ANNEXES | |
| A : Schémas des blocs et sous-blocs du circuit..... | 62 |
| B : Données de la table de correspondance du gain des impulsions..... | 73 |
| C : Table de vérité du codeur de "1"..... | 74 |
| D : Fichier des 15 RAM du calcul des PTAI..... | 75 |
| E : Fichier de commande des simulations sur Viewlogic..... | 90 |
| F : Fichier des simulations sur MATLAB..... | 91 |
| G : Rapports des résultats de mise en œuvre..... | 93 |

LISTE DES TABLEAUX

| | Page |
|---|------|
| 4.1 Signatures des signaux d'entrée-sortie | 39 |
| 4.2 Correspondance entre MH et le nombre d'échantillons à valider | 40 |
| 4.3 Paramètres de simulation | 48 |
| 4.4 Résultats de simulation sur MATLAB | 48 |
| 4.5 Résultats de simulation sur Viewlogic | 55 |
| 4.6 Type de FPGA utilisé | 56 |
| 4.7 Caractéristiques du FPGA utilisé | 56 |
| 4.8 Récapitulatif des résultats de mise en œuvre du circuit | 58 |

LISTE DES FIGURES

| | Page |
|---|------|
| 1.1 Processus de détection | 8 |
| 1.2 Influence du bruit | 9 |
| 1.3 Distribution de Rice du signal-plus-bruit reliant V_t , P_d , P_{fa} et P_m | 10 |
| 1.4 Courbes de P_d en fonction de SNR pour un P_{fa} donné | 11 |
| 1.5 Utilisation d'un seuil adaptatif | 15 |
| 2.1 Principes de décision du détecteur/estimateur | 18 |
| 2.2 Environnement du détecteur/estimateur (CGA) | 20 |
| 2.3 Paramètres de détection | 21 |
| 2.4 Paramètres d'estimation | 25 |
| 2.5 Méthodes de suréchantillonnage | 28 |
| 2.6 Suréchantillonnage avec $L = 3$ | 30 |
| 2.7 Histogramme des erreurs moyennes relatives des méthodes | 31 |
| 2.8 Schéma récapitulatif de l'analyse des méthodes | 32 |
| 2.9 Méthodes d'approximation du PTAI | 34 |
| 2.10 Courbes de comparaison de la précision versus N | 35 |
| 2.11 Courbes de comparaison de la complexité versus N | 36 |
| 2.12 Courbes de comparaison de la complexité versus la précision | 36 |
| 3.1 Impulsions simulées | 47 |
| 3.2 Simulation #1 sur Viewlogic avec $MH=0$, $TH1=20$ et $TH2=10$ | 49 |
| 3.3 Simulation #2 sur Viewlogic avec $MH=0$, $TH1=40$ et $TH2=10$ | 50 |
| 3.4 Simulation #3 sur Viewlogic avec $MH=0$, $TH1=75$ et $TH2=10$ | 51 |

| | | |
|-----|---|----|
| 3.5 | Simulation #4 sur Viewlogic avec MH=2, TH1=20 et TH2=10 | 52 |
| 3.2 | Simulation #5 sur Viewlogic avec MH=2, TH1=40 et TH2=10 | 53 |
| 3.3 | Simulation #6 sur Viewlogic avec MH=2, TH1=75 et TH2=10 | 54 |
| 3.8 | Opérations de mise en œuvre | 57 |

LISTE DES ABRÉVIATIONS

| | |
|----------|--|
| PTAI | Temps d'arrivée des impulsions |
| PLargeur | Largeur d'une impulsion |
| PValide | Signal de validation d'une impulsion |
| PDébut | Signal de début d'une impulsion |
| PFin | Signal de fin d'une impulsion |
| TH1 | Premier seuil de détection (sur front montant) |
| TH2 | Deuxième seuil de détection (sur front descendant) |
| PTH | Seuil de demi amplitude (sur échelle linéaire) correspondant au PTAI |
| MH | Paramètre lié au nombre d'échantillons d'amplitude supérieure à TH1 pour valider une impulsion (sur front montant) |
| Pd | Probabilité de détection d'une impulsion |
| Pfa | Probabilité de fausse détection d'une impulsion |
| Pm | Probabilité de détection manquée d'une impulsion |

INTRODUCTION

Historique

Le mot radar est l'acronyme de l'expression anglaise "radio detection and ranging", c'est à dire détection par radio et mesure de la distance. Durant le dernier conflit mondial, le radar a joué un rôle très important et sans cesse accru. En effet, son premier rôle fut de détecter, avertir à l'approche d'avions ennemis et diriger les armes antiaériennes. Il a été une des causes des énormes progrès de la technique des hyperfréquences. Aujourd'hui, les utilisations du radar sont multiples et font partie de notre vie quotidienne (capteurs, indicateurs de présence ou de vitesse, contrôle de trafic, détection et inventaire des ressources naturelles, détection de pollution, météorologie, etc...) mais les applications les plus spectaculaires sont d'ordre militaire ou spatial.

Le radar est un système électromagnétique pour la détection et la localisation d'objets. Il opère en transmettant un type particulier de formes d'ondes et déterminant la nature du signal écho. La forme d'onde la plus commune est celle d'impulsions rectangulaires modulant une porteuse sinusoïdale. Une forme élémentaire de système radar est présentée à la figure suivante. Il est composé d'un transmetteur, d'une antenne émettrice/réceptrice et d'un circuit de détection d'énergie ou récepteur. Le radar opère en transmettant des radiations électromagnétiques dans l'espace à surveiller. Tout objet réfléchissant (cible) situé dans cet espace intercepte des radiations situées dans sa direction et génère des réflexions. Cette portion de radiations est radiée à nouveau dans toutes les directions. Cette énergie radiée dans la direction de retour qui est de tout premier

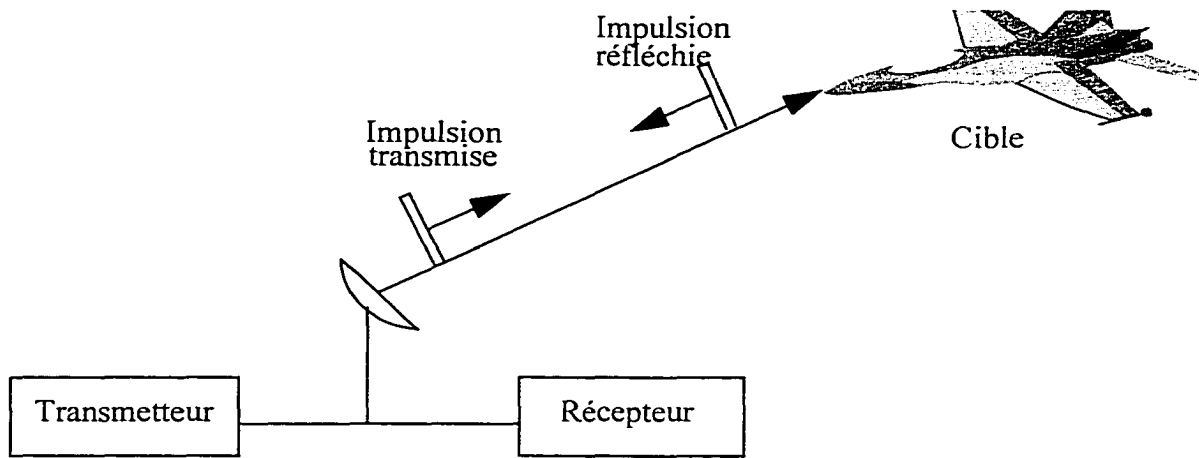


Schéma d'un système radar général

intérêt dans le radar. L'antenne réceptrice collecte une partie du rayonnement retourné et la délivre au récepteur qui procède à la détection de présence de cible et la détermination des caractéristiques du signal écho nécessaire pour le calcul de sa portée, sa vitesse relative, etc.

Quoique le fruit de ce mémoire puisse être inséré dans un système radar tel que celui de la figure ci-dessus, c'est plutôt pour un système d'alerte radar que le CGA a été à l'origine développé. La figure ci-dessous illustre un tel système. Le rôle de ce genre de système est de reconnaître le transmetteur (ex: avion ennemi) à l'origine des impulsions reçues. Le CGA se situe au niveau du récepteur.

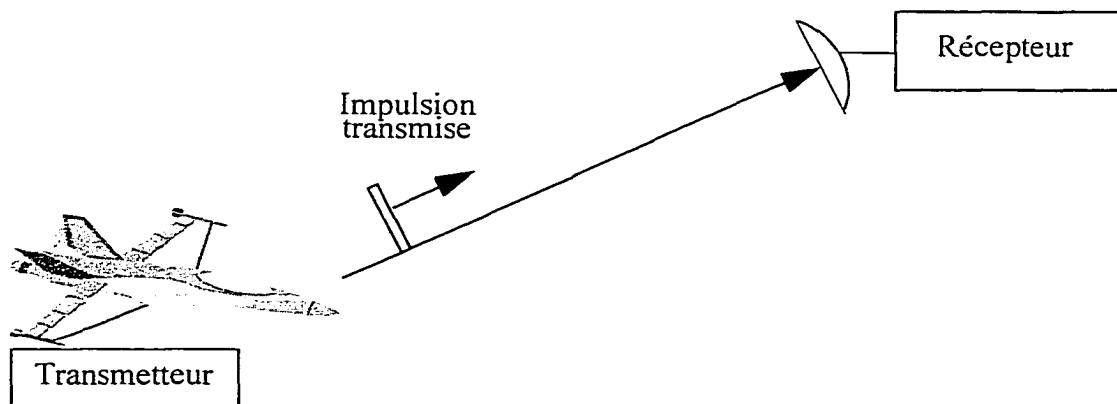


Schéma d'un système d'alerte radar

La grande utilité des systèmes radar a engendré un grand courant de recherches pour trouver des algorithmes performants et réalisables de détection de cible et d'estimation de mesures. Notre projet de développement numérique du CGA (contrôleur de gain automatique) d'un système radar s'inscrit dans ce courant de recherche.

Objectifs

L'objectif de ce mémoire consiste à développer un algorithme et une architecture matérielle permettant de détecter les impulsions et d'estimer avec une grande précision leurs *PTAI* (temps d'arrivée des impulsions) ainsi que leurs largeurs à l'intérieur CGA d'un système radar. Le diagramme bloc du CGA est représenté à la figure ci-dessous. C'est un système qui servira à contrôler un atténuateur de gain variable et enverra des mesures d'impulsions à un système informatique de reconnaissance. C'est grâce au CGA que le système de reconnaissance pourra traiter le signal de façon optimale.

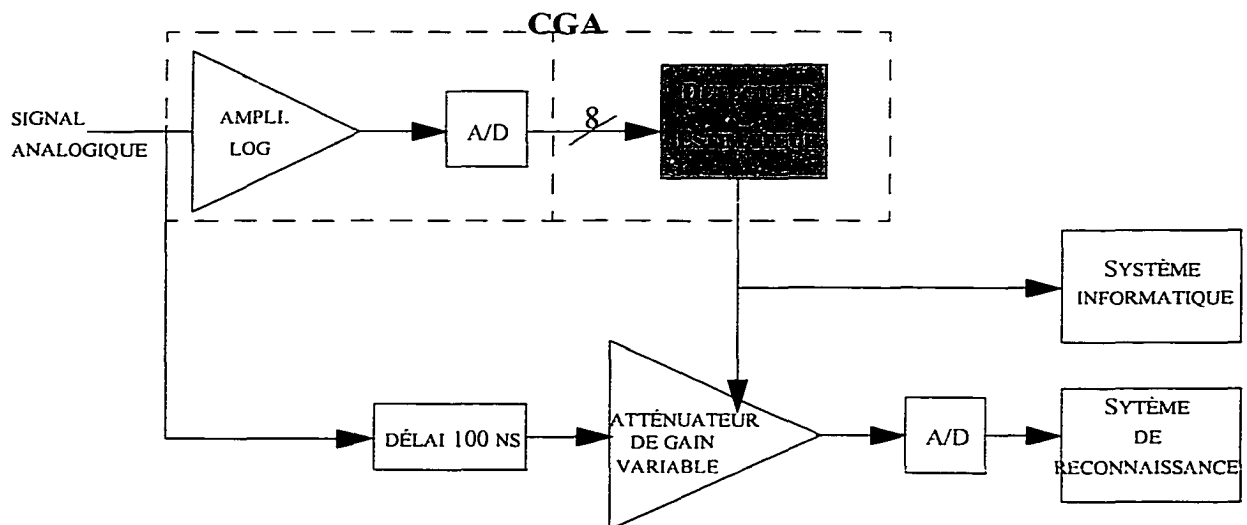


Diagramme bloc du CGA

Le circuit à concevoir, nommé détecteur/estimateur, recevra un signal numérique de 50 MHz provenant d'un amplificateur logarithmique et d'un convertisseur analogique/numérique. Cet amplificateur sert à réduire la plage dynamique de l'amplitude du signal. De cette manière, l'amplitude est écrite sur un nombre de bits minimal. Cela permet de réduire la taille du circuit puisque le nombre de bits à manipuler est réduit.

Pour ce travail, nous aurons à explorer et analyser différentes techniques adaptatives permettant d'effectuer les opérations de détection et d'estimation du radar. Un prototype matériel devra par la suite être réalisé. Auparavant, des simulations à l'aide du logiciel de conception et simulation Viewlogic devront être faites afin d'estimer les performances et la complexité réelles du circuit. De cette façon, l'optimisation du rapport performance/complexité pourra être accomplie en modifiant certains paramètres ou parties du circuit. Pour la conception du circuit, la technologie Virtex de Xilinx a été choisie.

Détection et estimation de PTAI dans un système radar

Les processus de détection et d'estimation sont à la base de toute application de système radar. La détection au récepteur consiste à déterminer la présence ou l'absence d'une cible étant donné un ensemble d'observations qui constituent le signal reçu. Associé à des ordinateurs qui traitent rapidement les informations reçues et les transforment pour les visualiser et les exploiter immédiatement, le radar est plus que jamais à la base des systèmes de surveillance aérienne. S'il est établi qu'une cible est présente, on peut procéder à l'estimation des paramètres qui caractérisent la cible. La majorité des systèmes radar utilisent des signaux impulsionnels. Pour décrire l'enveloppe de ces impulsions, il est convenable d'utiliser des descripteurs ou paramètres assez faciles à mesurer. Les paramètres du radar qui attirent notre intérêt sont le début, la fin, la validité, la largeur et le temps d'arrivée de l'impulsion.

Contributions

Le processus d'adoption d'un nouveau principe ou algorithme de détection d'impulsion et d'estimation du *PTAI* pour un CGA radar passe par une démonstration matérielle du concept. La validation de résultats de simulation est alors une étape fondamentale. En effet, la réalisation matérielle étant coûteuse, il est nécessaire de s'assurer auparavant du bon fonctionnement du circuit. De plus, le choix de la technologie, les outils de développement, les contraintes physiques et matérielles sont autant de paramètres qui influencent les résultats de performance.

Au terme de ce projet, nous comptons avoir contribué à créer une expertise quant à la réalisation matérielle d'un nouveau circuit numérique permettant de détecter les impulsions radar et d'estimer leur *PTAI* dans le CGA d'un système radar.

Contenu du rapport

Ce rapport se divise en quatre chapitres. Le chapitre 2 introduit les principes de détection de cible et d'estimation. On y trouve les fondements théoriques qui permettent d'évaluer les performances des algorithmes proposés. Des résultats de simulation sur MATLAB permettent de justifier chacune des étapes. Le chapitre 3 décrit la conception de ces blocs sur le logiciel Viewlogic avec une explication des différentes opérations qui leur sont inhérentes. Des résultats de simulation sont par la suite présentés pour justifier à nouveau le choix de notre démarche. Le chapitre 4 traite de la mise en oeuvre du circuit et de sa réalisation matérielle. Ce chapitre fournit les résultats réels de la complexité et des performances du circuit. Le rapport se termine par une conclusion mettant en relief les principales caractéristiques du détecteur/estimateur.

CHAPITRE I

PRINCIPES DE DÉTECTION ET D'ESTIMATION

DANS UN RÉCEPTEUR RADAR

1.1 Introduction

Les détecteurs de cibles et estimateurs d'ondes font partie des circuits principaux d'un récepteur radar. Les premiers utilisent deux principales techniques ayant des complexités et performances différentes qui s'adaptent à tel ou tel type d'application. On parle de détection par intégration et de détection à impulsion unique. Ces techniques se basent sur le même principe, à savoir l'utilisation d'un seuil de comparaison. Ce présent chapitre nous permet de présenter ces techniques de détection et par la même occasion d'aborder les problèmes d'estimation liés au signal radar.

1.2 La détection

Le problème de détection de cible dans un système est un problème statistique par nature du fait que des fluctuations aléatoires dues au bruit à la sortie du récepteur corrompent le signal de cible et influencent la performance du détecteur. La détection d'une cible au récepteur se réfère alors à la décision faite par le détecteur radar quant à la présence ou à l'absence du signal utile en présence du bruit additif.

1.2.1 Type de problème de détection

La complexité d'un processus de détection est fonction des changements que subit le signal original. Dans un système radar, le signal reçu subit une atténuation d'amplitude et un décalage en phase avant de s'ajouter au bruit du récepteur. Ceci crée une certaine incertitude à la détection du signal même en absence de bruit. Pour une onde impulsionnelle $s(t) = A \sin(w_c t)$ transmise pendant une période T , le signal à la sortie du récepteur est de la forme :

$$r(t) = V_r \sin[(w_c - w_d)(t - \tau)] + \theta_r + n(t) \quad \tau \leq t \leq \tau + T \quad (1.1)$$

$$= n(t) \quad \text{ailleurs} \quad (1.2)$$

si la cible est présente et

$$r(t) = n(t) \quad 0 \leq t < \infty \quad (1.3)$$

si elle ne l'est pas. w_d définit le décalage Doppler causé par le mouvement de la cible et τ son délai de propagation. On voit qu'en absence du bruit même si w_d et τ sont connus, le signal contient encore des variables inconnues (V_r l'amplitude, θ_r la phase) qui affectent la performance du processus de détection. On parle de "problème de détection de signal dans le bruit avec paramètres inconnus".

1.2.2 Principes et probabilités de détection

Comme il a été dit auparavant, le principe de détection d'un système radar est basé sur l'utilisation d'un seuil de comparaison servant à extraire des informations du signal reçu et à distinguer une fluctuation due au bruit à celle due à un signal utile. Ce seuil peut être fixé manuellement ou déterminé par un circuit de traitement de signaux radar. Tout signal dont l'amplitude est supérieure à celle du seuil est considéré dû à la cible sinon on suppose qu'on est en présence de bruit (voir figure 1.1). Ce type de décision n'est cependant pas toujours justifié. En effet, le dépassement du seuil peut être

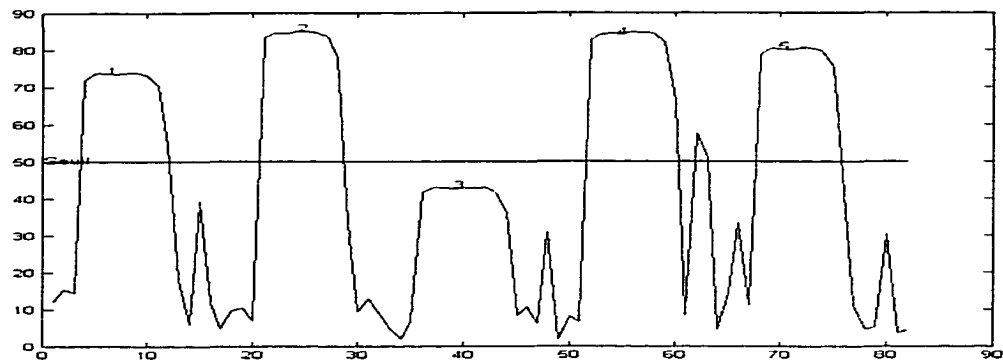


Figure 1.1 Processus de détection

effectivement dû au signal mais il peut aussi être causé par une grande augmentation accidentelle de l'amplitude du bruit. On fait alors une mauvaise détection en déclarant la cible présente. Déclarer qu'une cible est présente quand le dépassement du seuil est dû effectivement à la cible est appelé *détection valide*. Lorsque ce dépassement est dû uniquement au bruit, on parle de *fausse alarme*. Il est possible que le signal de la cible soit présent mais que son amplitude ne dépassant pas la tension seuil, il ne soit pas détecté. Cette condition est appelée *détection de cible manquée*. On quantifie ces trois types d'événements à l'aide de densités de probabilité du bruit et du signal de cible. Les probabilités associées sont P_{fa} la probabilité de fausse alarme, P_d celle de détection valide et P_m ($P_m = 1 - P_d$) celle de détection manquée. Nous verrons plus tard que P_{fa} , P_d et P_m sont liées au rapport signal-à-bruit à l'entrée du détecteur et du seuil de détection.

Considérons l'entrée du détecteur de la figure 1.2 représentant six périodes de transmission d'impulsions. On constate que l'enveloppe à une apparence fluctuante due à la nature aléatoire du bruit. Soient V_{T1} , V_{T2} et V_{T3} trois seuils de détection choisis tel que V_{T1} et V_{T2} sont respectivement proches des amplitudes maximale et moyenne des impulsions, et V_{T3} de la moyenne du bruit. On remarque que V_{T3} détecte toutes les impulsions mais détecte aussi des pics dus au bruit (ex: pic A). V_{T2} permet de détecter

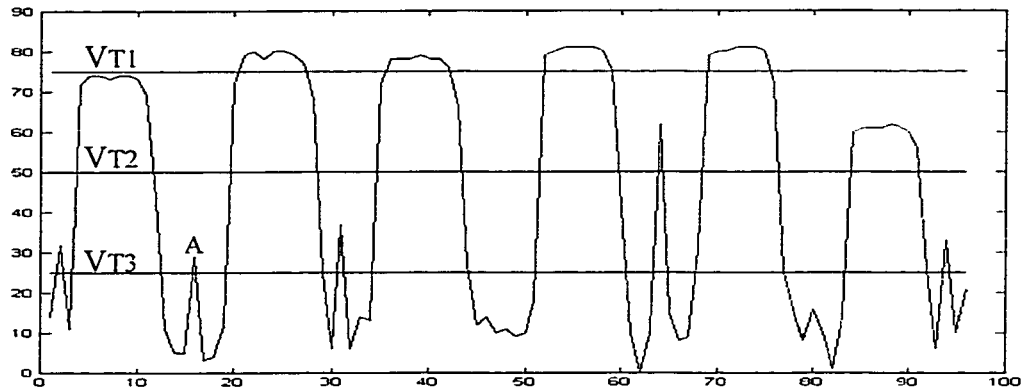


Figure 1.2 Influence du seuil de détection

le maximum d'impulsions avec un taux réduit de fausses alarmes. Un seuil d'ordre $VT1$ par contre permet seulement de détecter des impulsions de grande amplitude. Certes le nombre de fausses alarmes est presque inexistant mais des impulsions d'amplitudes moyennes ne sont pas détectées. On conclut que plus le seuil de détection est faible, plus P_{fa} et P_d sont grandes. Pour réduire P_{fa} et garder P_d relativement grand, il faut fixer un seuil supérieur la moyenne de bruit. Cependant un seuil trop élevé même s'il réduit P_{fa} peut aussi réduire P_d et augmenter P_m . Ces différentes relations entre P_{fa} , P_d , P_m , le bruit et le seuil peuvent être démontrées mathématiquement comme suite.

Supposons notre détecteur linéaire et un bruit blanc gaussien associé au signal. La densité de probabilité du bruit à la sortie d'un récepteur radar est décrite par la fonction Rayleigh et s'écrit [4] :

$$P_n(v) = (v/N) \exp(-v^2/2N) \quad (1.4)$$

où N est la puissance rms du bruit. Pour une tension seuil V_T , P_{fa} est donné par :

$$P_{fa} = \int_{V_T}^{\infty} (v/N^{1/2}) \exp(-v^2/2N^{1/2}) dv \quad (1.5)$$

$$= \exp(-V_T^2/2N^{1/2})$$

ou encore

$$V_T = \sqrt{(2N^{1/2} \ln P_{fa})} \quad (1.6)$$

Pour un signal sinusoïdal transmis, la densité de probabilité du signal vidéo au détecteur est donnée par l'équation de Rice. On a [4] :

$$P_{s+n}(v, A, N) = (v/N) \{ \exp(-(v^2 + A^2)) \} I_0(Av/N) \quad (1.7)$$

où $P_{s+n}(v)$ est la densité de probabilité du signal plus bruit et A l'amplitude de ce signal. I_0 est la fonction de Bessel d'ordre zéro. Le rapport signal-à-bruit associé à ce signal sinusoïdal est donné par :

$$SNR = A^2/(2N) \quad (1.8)$$

Sur la courbe de la figure 1.3 représentant la distribution de Rice [7], on voit que le pic se déplace vers la droite lorsque SNR augmente.

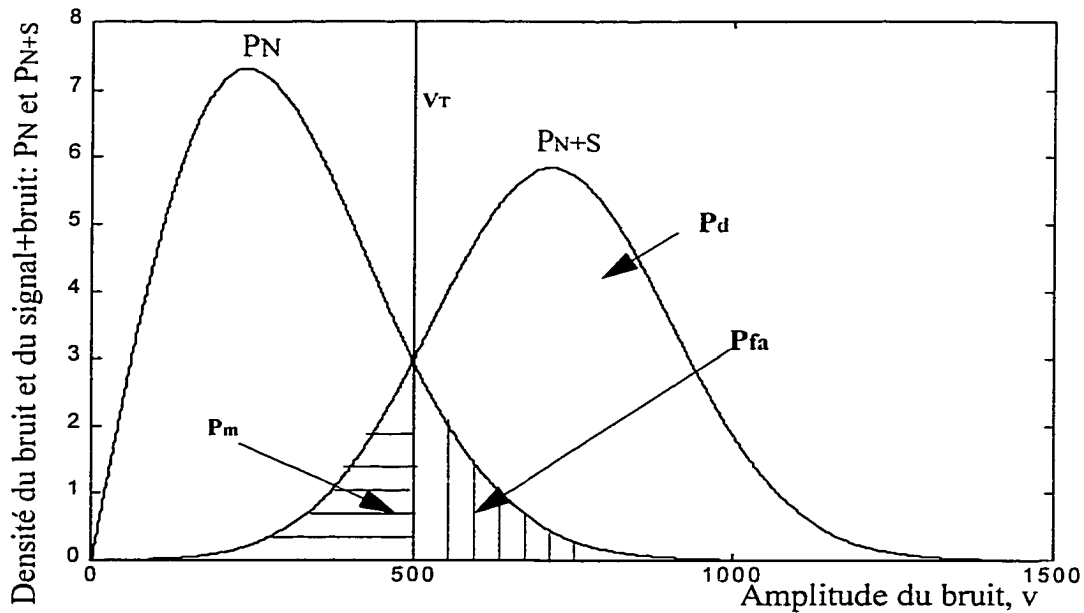


Figure 1.3 Distribution de Rice du signal-plus-bruit reliant V_T , P_d , P_{fa} et P_m

La probabilité de détection étant représentée par l'aire en dessous de la courbe située à droite de V_T , on conclut que P_d augmente avec SNR . On a :

$$P_d(v, SNR) = \int_{V_T}^{\infty} P_{s+n}(v, A, N) dv \quad (1.9)$$

La probabilité de non-détection P_m est donnée par :

$$P_m = 1 - P_d(v, SNR) \quad (1.10)$$

On voit sur cette figure que P_d , P_m et P_{fa} sont liés au seuil. Plus le seuil est grand, plus P_d et P_{fa} diminuent. L'établissement du seuil correspond donc à fixer un taux de fausses alarmes. Ces résultats démontrés mathématiquement sont résumés par les courbes de la figure 1.4 [7]. Ces courbes représentent la probabilité de détection par rapport à SNR pour une probabilité de fausse alarme donnée.

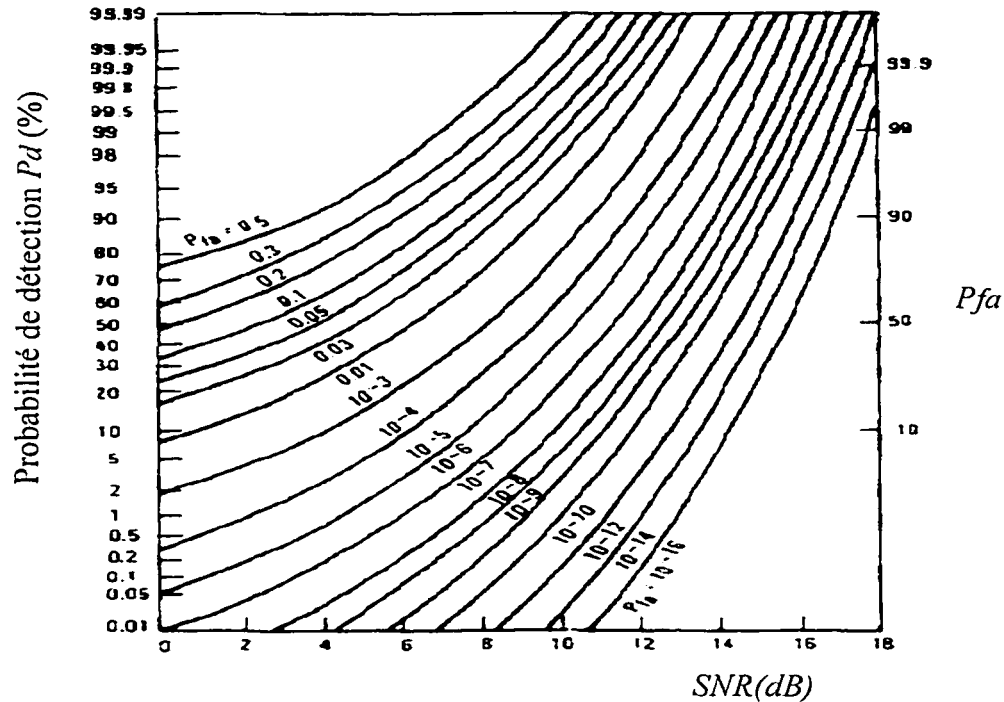


Figure 1.4 Courbes de P_d en fonction de SNR pour un P_{fa} donné

On conclut que pour un seuil de détection fixé (P_{fa}), plus SNR est grand, plus grande est la probabilité de détection. De même pour un SNR donné, plus la probabilité de fausse alarme est petite (plus le seuil est grand), plus la probabilité de détection est faible. D'après le critère de Neymann-Pearson, la probabilité de détection de la cible est optimisée sous réserve que la probabilité de fausse alarme est maintenue en dessous d'un niveau maximal [1]. Bien que ces résultats aient été dérivés pour un détecteur linéaire, ces figures s'appliquent également pour tout type de détecteur [4]. Ces démonstrations mathématiques renforcent les conclusions faites à partir de la figure 1.2 concernant P_{fa} , P_d , P_m , V_T et SNR .

1.2.3 Techniques de détection dans un système radar

Jusqu'à présent, nous avons considéré que le processus de détection était basé sur le traitement d'une seule impulsion. Cependant dans un système radar, il peut être recommandé d'intégrer un nombre d'impulsions avant d'effectuer une détection par seuil pour améliorer la capacité de détection. Les techniques de détection sans paramètres connus dans un système radar se divisent alors en deux grands groupes : la détection par intégration et la détection à impulsion unique.

1.2.3.1 Détection par intégration

La probabilité de détection d'une cible peut être augmentée en intégrant une série d'impulsions reçues. Cette intégration peut se faire de manière cohérente ou non cohérente. L'intégration cohérente appelée aussi intégration de prédétection est basée sur la préservation de la phase et de l'amplitude du signal de retour de chaque impulsion. Par contre la détection non cohérente est effectuée après la détection et additionne essentiellement une fraction de chaque impulsion en moyenne ; la phase de chaque impulsion est perdue après le processus de détection. L'intégration non cohérente est aussi appelée intégration postdétection.

Considérons le cas d'une détection à intégration cohérente. Dans ce type d'intégration où la cohérence entre impulsions transmises est requise, les amplitudes A_i et les phases ϕ_i sont identiques. En supposant que la seule modification subit par le signal transmis est celle du bruit, les amplitudes et phases des impulsions reçues (sans bruit) sont les mêmes que celles transmises. Si n impulsions sont transmises pendant une période T et intégrées, le signal résultant a pour amplitude :

$$A_{Total} = \sum_{i=1}^n A_i = nA \quad (1.11)$$

et pour puissance :

$$S_T = (A_T)^2 = (nA)^2 = n^2 A^2 = n^2 S \quad (1.12)$$

avec S la puissance du signal de retour d'une impulsion. D'autre part si N est la puissance du bruit associée à une impulsion, le bruit étant une variable aléatoire, les puissances du bruit dans les n impulsions s'additionnent pour donner une puissance totale de bruit: $N_T = nN$. Le rapport signal-à-bruit résultant est donné par :

$$SNR_T = S_T/N_T = (n^2 S)/(nN) = n(S/N) \quad (1.13)$$

A l'aide du signal résultant, on procède à une détection par seuil comme expliqué auparavant. Puisque l'intégration cohérente permet une augmentation du rapport signal-à-bruit (SNR) d'un facteur n (nombre d'impulsions intégrées), on peut conclure à partir des remarques faites au paragraphe 1.2.3 qu'elle permet d'améliorer la probabilité de détection P_d . Certes une détection par intégration augmente P_d mais elle nécessite un circuit d'intégration qui occasionne des délais de traitement du signal. Puisque le temps de traitement de notre circuit est limité (latence de 10 périodes d'horloge), nous ne pouvons pas adopter ce genre de technique de détection. Tout comme l'intégration cohérente, l'intégration non cohérente améliore la qualité de détection par le biais du rapport signal-à-bruit mais pour les mêmes raisons que la première, elle ne sera pas adoptée dans notre projet.

1.2.3.2 Détection à impulsion unique

Dans les radars à ondes continues, une seule impulsion de longue durée est émise à chaque période d'observation T de la cible. Le type de détection qu'on effectue dans ce cas est celui décrit dans le paragraphe 1.2.3. Pendant chaque période T , une détection simple par seuil (sans intégration) est effectuée. Tout pic de tension supérieur au seuil est considéré dû à un signal utile et déclare valide l'impulsion. Dans une période T de détection, seule une impulsion est traitée et peut être validée. On parle alors de détection à impulsion unique. Puisque nous sommes limités en délai de traitement de l'impulsion, c'est ce type de détection que nous allons adopter pour notre circuit.

1.3 L'estimation d'une impulsion radar

Dans un système radar, suivant les intérêts d'une application, deux types d'estimation sont faits; à savoir, l'estimation des paramètres et l'estimation de la forme d'onde impulsionnelle. Une estimation de paramètres permet d'estimer des paramètres caractérisant la cible tels que la portée ou la direction de la cible. Par contre dans une estimation de forme d'onde, on estime plutôt les paramètres de la forme d'onde. Dans le cas de notre projet, nous devons estimer les paramètres de l'onde impulsionnelle tels son temps d'arrivée et sa largeur.

1.3.1 Théorie d'estimation du signal

Il existe un lien entre le niveau de détection d'une impulsion radar et celui de son estimation. Comme le montre l'équation 1.2, dans les deux cas le signal reçu possède des caractéristiques inconnues qui rendent son traitement difficile. Dans le cas de l'estimation, on parle aussi de problème d'estimation avec paramètres inconnus. C'est à ce type problème que nous sommes confrontés dans notre projet.

1.3.2 Technique d'estimation et influence du bruit

Comme dans le cas de la détection, les variations du signal impulsionnel dues au bruit causent de nombreuses erreurs d'estimation de paramètres. En effet, le bruit à la sortie du récepteur peut modifier la forme des impulsions alors que toutes les estimations des paramètres sont faites à partir d'elle. Ces déformations peuvent donc biaiser toutes les estimations. Cependant des astuces peuvent être utilisées pour minimiser ces problèmes d'estimation. Par exemple sur la figure 1.5 a, on voit que des fluctuations de bruit qui entraînent une réduction de l'amplitude d'une impulsion peuvent fausser l'estimation de son temps d'arrivée *PTAI* dans le cas d'une détermination avec seuil fixe V_T . En rappelant que le *PTAI* est le temps correspondant au seuil V_T , on constate que le *PTAI* de l'impulsion forte (impulsion originale) précède celle de l'impulsion faible (impulsion atténuée). L'utilisation d'un seuil adaptatif situé à mi-chemin des amplitudes maximale et minimale (sur une échelle linéaire) permet de réduire ce problème [Pierre

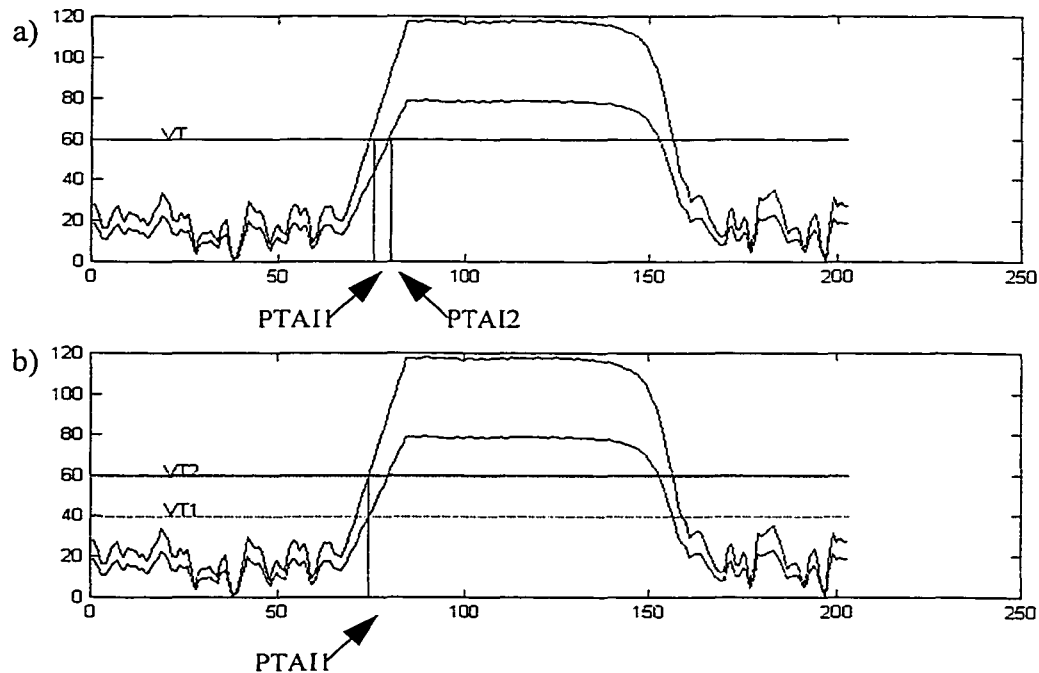


Figure 1.5 Utilisation d'un seuil adaptatif

Lavoie, communications personnelles]. Ce type de seuil permet en effet d'obtenir les mêmes valeurs du $PTAI$ et de la durée de l'impulsion pour des impulsions d'amplitudes différentes mais de temps de montée et de descente identiques (voir figure 1.5 b).

1.4 Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'aborder les théories de processus de détection et d'estimation qui concernent la conception de notre circuit. Suite aux analyses des différentes techniques exposées et aux contraintes de notre circuit, nous avons décidé d'adopter une technique de détection à impulsion unique et d'estimation du temps d'arrivée avec utilisation d'un seuil adaptatif. En effet, puisque le délai de traitement du circuit de détection et d'estimation est limité à 10 coups d'horloge, nous ne pouvons pas adopter de technique de détection avec intégration bien que ce type de technique augmente le rapport signal-à-bruit et donc améliore la probabilité de détection. Le seuil adaptatif associé à chaque impulsion se situe à mi-chemin entre son amplitude maximale et son amplitude minimale pour une échelle linéaire.

CHAPITRE II

DESCRIPTION DES BLOCS FONCTIONNELS DU CIRCUIT

2.1 Introduction

Ce chapitre décrit les fonctionnalités et la structure générale du détecteur/estimateur de signaux radar à concevoir. Rappelons que notre choix s'est porté sur un circuit travaillant en mode adaptatif pour une détection à impulsion unique. Dans un premier temps, nous allons essayer de décrire brièvement l'environnement du circuit que constitue le CGA du récepteur. Un modèle simplifié du circuit sera ensuite élaboré et ses performances théoriques seront évaluées. Le circuit doit pouvoir remplir tous les critères de fonctionnement imposés et présenter de bonnes performances physiques de par sa vitesse, sa latence et sa taille.

2.2 Principes de décision du détecteur/estimateur

Le détecteur/estimateur détecte les impulsions dues au signal radar à l'aide de deux seuils de comparaison $TH1$ et $TH2$, et estime les différents paramètres de l'onde. Utilisée avec un signal numérique, cette technique consiste à utiliser le premier seuil $TH1$ pour détecter le front montant d'une impulsion et le seuil $TH2$ pour détecter son front descendant. Pour qu'un échantillon soit validé pendant un front montant, son amplitude doit être supérieure à $TH1$. Par contre pour qu'il soit validé pendant un front

descendant, son amplitude doit être inférieure à $TH2$. Pour valider un front et déclarer l'impulsion valide, le nombre d'échantillons valides doit être supérieur à une valeur donnée. Le premier échantillon inférieur à $TH2$ suite à une validation d'impulsion permet de détecter le front descendant de l'impulsion et de déclarer sa fin. L'estimation des paramètres de l'onde se fait parallèlement au processus de détection. On résume ces deux processus par la figure 2.1 où sous une hypothèse H_i ($i = 0$ ou 1), une décision h_i est prise pour valider ou non les paramètres estimés. Chaque fois qu'une décision h_1 est prise, les paramètres sont validés. Les décisions étant faites sur des observations bruitées, il existe une probabilité d'erreur se traduisant par de mauvaises détections et d'estimations.

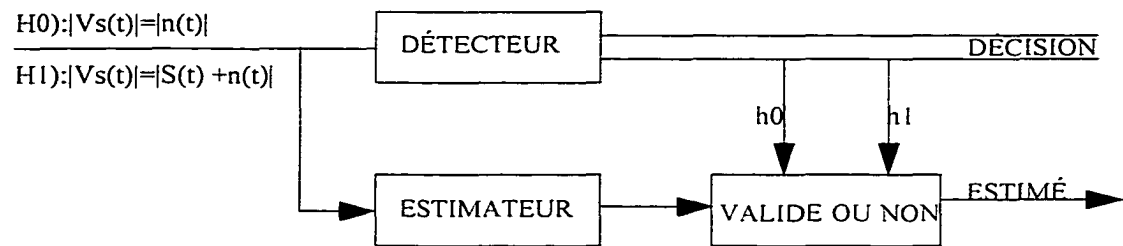


Figure 2.1 Principes de décision du détecteur/estimateur

On distingue quatre cas:

- cas 1 : décision en faveur de h_0 quand H_0 est vraie

En absence du signal $S(t)$, aucune impulsion n'est détectée et les paramètres estimés sont rejetés. On a un bon résultat de détection-estimation.

- cas 2 : décision en faveur de h_1 quand H_1 est vraie

En présence du signal $S(t)$, une impulsion est détectée et les paramètres estimés sont acceptés. On a un bon résultat de détection-estimation.

- cas 3: décision en faveur de h_1 quand H_0 est vraie

Bien que le signal $S(t)$ soit absent, un pic de bruit provoque une validation d'impulsion et les paramètres sont acceptés. C'est un cas de "fausse alarme".

- cas 4: décision en faveur de h_0 quand H_1 est vraie

Bien que le signal $S(t)$ soit présent, aucune impulsion n'est détectée et les paramètres sont rejetés. Cette mauvaise validation est appelée "détection manquée".

Dans tous ces cas, c'est le résultat de la détection qui valide celui de l'estimation.

2.3 Description générale de l'environnement du circuit

Le détecteur/estimateur d'impulsions représente le bloc principal du CGA. C'est lui qui génère toutes les commandes à envoyer à l'atténuateur et au système informatique. La figure 2.2 montre le schéma détaillé de son environnement. Le CGA est composé d'une partie analogique nommée tampon sur cette figure représentant l'amplificateur logarithmique et le convertisseur analogique numérique, et une partie numérique représentant le circuit de détection-estimation proprement dit (bloc en gris). Cette partie numérique est commandée par plusieurs signaux de paramètres dont les principaux sont: *Data*, *TH1*, *TH2*, *MH*, *Reset*, *Begin* et le signal d'horloge de 50 MHz du CGA. Les échantillons du signal impulsionnel provenant du convertisseur sont envoyés dans le détecteur-estimateur. Ceux-ci sont alors soumis aux processus de détection et estimation pour générer les signaux *PDmax*, *PValide*, *PDebut*, *PFin*, *PLargeur* et *PTAI*. Le signal *PDmax* est envoyé dans la LUT_PARAM qui est une table de correspondance du gain *PGain* à envoyer à l'atténuateur. A chaque amplitude maximale d'impulsion correspond un gain donné. Les autres signaux sont envoyés au système informatique. La section suivante permet de décrire chacun des signaux d'entrée/sortie du détecteur/estimateur.

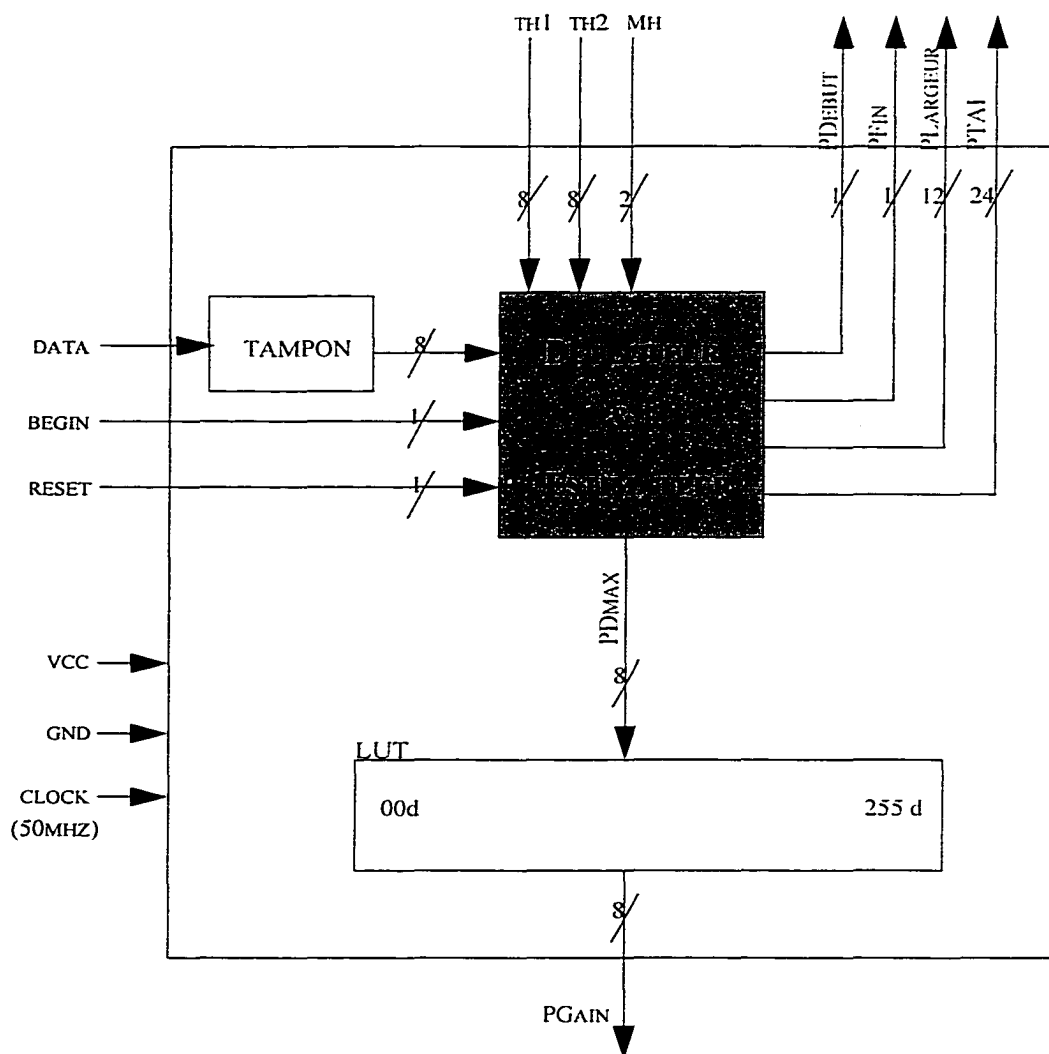


Figure 2.2 Environnement du détecteur/estimateur (CGA)

2.4 Le détecteur d'impulsions

Dans notre circuit, le bloc détecteur joue plusieurs rôles principaux. C'est lui qui doit détecter les impulsions valides, déterminer leurs amplitudes maximales et détecter leurs débuts et leurs fins. Il génère les signaux *PDmax*, *PValide*, *PDebut* et *PFin*.

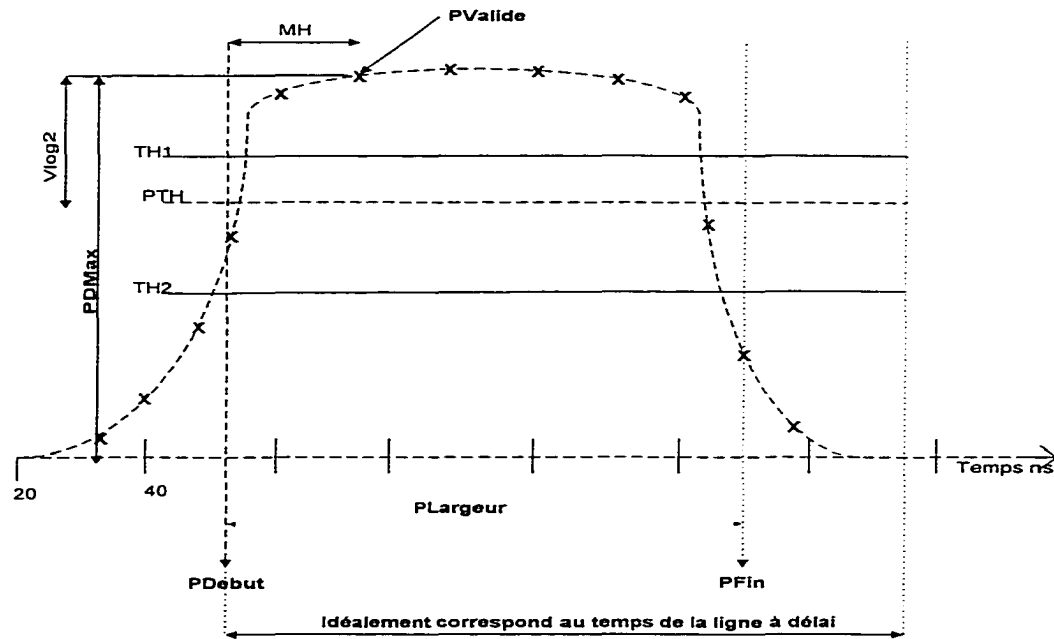


Figure 2.3 Paramètres de détection

Avant de décrire ses différentes fonctions, nous allons définir les différents signaux et paramètres liés à la détection de nos impulsions en s'aidant de la figure 2.3.

2.4.1 Signaux et paramètres de détection

* Donnée d'entrée: *Data* (8 bits)

C'est une donnée d'entrée de 8 bits représentant l'amplitude des échantillons du signal d'entrée.

* Premier seuil de détection: *TH1* (8 bits)

C'est une donnée de 8 bits représentant la tension du premier seuil de comparaison

utilisé pour les échantillons du front montant. C'est lui qui permet de détecter le début d'une impulsion et de déclarer celle-ci valide.

*** Début d'impulsion: $PDebut$ (1 bit)**

C'est un signal de sortie d'un bit correspondant au début approximatif de l'impulsion. Il est généré par le premier échantillon au dessus du premier seuil fixe THI . On parle de détection du front montant.

*** Nombre minimum d'échantillons valides: MH (2 bits)**

$MH+1$ représente le nombre d'échantillons successifs supérieurs à THI qui est nécessaire pour valider une impulsion. Une grande fluctuation accidentelle de bruit peut déclencher une mauvaise validation d'échantillon. L'augmentation de MH permet de réduire le nombre de cas de fausses alarmes. Cependant, un MH trop grand risque de diminuer Pd puisque des impulsions normalement valides mais peu larges risquent de ne pas être détectées. La valeur de MH est donc choisie en fonction de la durée de l'impulsion. Notons aussi que même si les impulsions ont des durées assez grandes, la valeur de MH reste limitée par le délai de traitement du CGA. En effet, plus MH est grand, plus le temps mis pour valider l'impulsion et calculer ses différents paramètres est grand.

*** Validité: $PValide$ (1 bit)**

Pour filtrer le maximum de fausses alarmes et éviter ainsi de fausses décisions, toute impulsion est déclarée valide et donc détectée s'il existe au moins $MH+1$ échantillons successifs sur le front montant dont les amplitudes sont supérieures à THI . C'est le $MH+1$ ème échantillon d'amplitude supérieure à THI qui génère le signal $PValide$.

*** Amplitude maximale: $PDmax$ (8 bits)**

L'amplitude maximale de l'impulsion est la plus grande parmi les $MH+1$ derniers échantillons précédant sa validation.

*** Seuil de l'impulsion: PTH (16 bits)**

Le seuil de l'impulsion valide correspond à l'amplitude de demi-voitage sur l'échelle logarithmique. Pour un signal analogique $V_e(t)$ (sur l'échelle linéaire) à l'entrée du CGA, le signal numérique (après passage dans l'amplificateur logarithmique) à l'entrée du système de détection est de la forme:

$$V_s(n) = V \log \left[\frac{V_e(n)}{V_0} \right] \quad (2.1)$$

V_0 et V sont des paramètres de l'amplificateur logarithmique. Soient PD_{max} et PTH , les amplitudes des points correspondant au maximum et au seuil de l'impulsion. En considérant que V_{max} est la valeur à l'entrée de l'amplificateur logarithmique correspondant au maximum, on a d'après l'équation 2.1:

$$\begin{aligned} PD_{max} &= V \log V_{max} - V \log V_0 \\ PTH &= V \log \left(\frac{V_{max}}{2} \right) - V \log V_0 \\ &= V \log V_{max} - V \log V_0 - V \log 2 \end{aligned} \quad (2.2)$$

On obtient:

$$PTH \cong PD_{max} - V \log 2 \quad (2.3)$$

Le calcul du seuil revient donc à soustraire une constante $V \log(2)$ programmable de l'amplitude maximale de l'impulsion.

*** Deuxième seuil de détection: $TH2$ (8 bits)**

C'est le seuil de comparaison utilisé pour les échantillons en descente. Il permet de détecter la fin d'une impulsion.

*** Fin d'impulsion: $PFin$ (1 bit)**

C'est le temps du premier échantillon en dessous du seuil $TH2$. Cet échantillon génère le signal de fin d'impulsion ($PFin$). On parle de détection du front descendant.

2.4.2 Fonctionnement du détecteur

Le principe de fonctionnement du détecteur repose sur l'amplitude des échantillons et des valeurs des seuils $TH1$ et $TH2$. Pendant le front montant d'une impulsion, chaque échantillon est comparé au seuil $TH1$. Dès qu'un échantillon d'amplitude supérieure à $TH1$ est détecté, un signal $PDebut$ est généré. On dit qu'on a détecté le début d'une impulsion. Si par la suite on détecte $MH+1$ échantillons successifs d'amplitudes supérieures à $TH1$, le signal $PValide$ est généré pour valider l'impulsion. On détermine alors l'amplitude maximale $PDmax$ de l'impulsion et son seuil PTH . Si suite à la détection d'un début d'impulsion, l'amplitude d'un échantillon tombe en dessous de $TH1$ avant que l'impulsion soit validée, on réinitialise tout le détecteur et on recommence la détection d'un front montant. Après avoir validé une impulsion, on commence la détection du front descendant. Ce processus consiste à comparer l'amplitude des échantillons entrant au deuxième seuil $TH2$. Dès qu'on détecte 1 échantillon en dessous de $TH2$, un signal $PFin$ est généré. On dit qu'on a détecté la fin de l'impulsion. On réinitialise alors tout le détecteur et on recommence le processus de détection de front montant. Le signal $PValide$ est chaque fois retardé de $5 \cdot MH$ coups d'horloge de sorte que quelque soit la valeur de MH , il y ait 5 coups d'horloge entre $PDebut$ et $PValide$. Cela permet une synchronisation des signaux de sortie.

2.5 L'estimateur

Rappelons que l'estimateur est la partie de notre circuit qui calcule le temps d'arrivée $PTAI$ de l'onde impulsionnelle et sa largeur $PLargeur$. Avant de décrire son fonctionnement, nous allons définir ces deux paramètres illustrés par la figure 2.4.

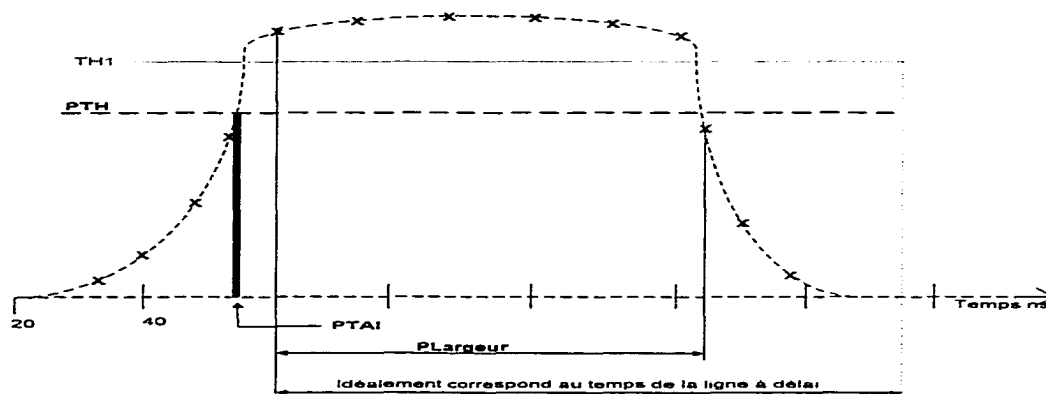


Figure 2.4 Paramètres d'estimation

2.5.1 Paramètres à estimer

* Largeur d'impulsion: *PLargeur* (12 bits)

La largeur de l'impulsion est définie comme étant la durée de temps entre le début de l'impulsion et sa fin. C'est le nombre de coups d'horloge entre la génération des signaux *PDebut* et *PFin*.

* Temps d'arrivée de l'impulsion: *PTAI* (24 bits)

Le *PTAI* d'une impulsion est le temps correspondant à son seuil *PTH*. Le signal impulsionnel d'entrée du détecteur/estimateur étant numérique, ce seuil ne correspond pas en général à l'amplitude exacte d'un échantillon existant. Il est plutôt compris entre deux échantillons. La résolution de l'estimé du *PTAI* est donc limitée par la période d'échantillonnage T_s du signal. Pour résoudre ce problème et augmenter la précision de l'estimé, le signal est interpolé entre les points situés à proximité du seuil. La section 2.5.3 décrit différentes méthodes qui pourraient répondre à nos besoins. Auparavant, décrivons le fonctionnement du bloc d'estimation.

2.5.2 Fonctionnement de l'estimateur

Comme il a été dit plus tôt, l'estimateur fonctionne en parallèle avec le détecteur. La largeur $PLargeur$ de l'impulsion étant le temps entre $PDebut$ et $PFin$, elle est déterminée par un compteur $Cpt_Largeur$ qui est déclenché par $PDebut$ et arrêté par $PFin$. Parallèlement à ce processus, au signal $PValide$, on détermine la valeur du seuil PTH de l'impulsion à partir de son amplitude maximale et de l'équation 2.3. On passe ensuite au processus d'interpolation du $PTAI$. Pour cela, on utilise les points situés autour du seuil. Plusieurs méthodes d'interpolation sont présentées au paragraphe suivant. $PTAI$ est synchronisé de sorte qu'il y ait 10 périodes d'horloge entre l'envoi de $PDebut$ et celui de $PTAI$. Par contre $PLargeur$ est envoyé en même temps que $PFin$.

2.5.3 Méthodes d'interpolation et performances théoriques

L'interpolation du $PTAI$ est effectuée après validation de l'impulsion et calcul du seuil PTH . Il existe plusieurs méthodes d'interpolation susceptibles de faire une bonne estimation du $PTAI$ d'une impulsion. Cependant toutes n'ont pas la même efficacité et la même complexité de conception matérielle. Après une étude explorative de différentes méthodes d'interpolation possibles pour notre estimateur, nous en avons sélectionnées sept qui présenteraient des avantages du point de vue de la précision, de complexité ou du coût. Ce sont:

- la détection simple,
- la détection du milieu,
- l'interpolation linéaire,
- l'interpolation quadratique,
- l'interpolation par la spline cubique,
- l'interpolation par suréchantillonnage, et
- l'interpolation par suréchantillonnage suivie d'une interpolation linéaire.

2.5.3.1 Définitions des méthodes

*Détection simple

C'est l'interpolation la plus simple. Elle consiste à comparer les différents échantillons du front montant de l'impulsion au seuil PTH , à détecter le point M1 du signal situé juste après le seuil et à déterminer son abscisse XI . Le calcul du $PTAI$ se résume alors à l'équation:

$$PTAI = X_1 \quad (2.4)$$

* Détection du milieu

Elle consiste à comparer les différents échantillons du front montant de l'impulsion au seuil PTH , à détecter les points M0 et M1 du signal situés respectivement juste avant et après le seuil et à déterminer leurs abscisses $X0$ et XI . Le calcul du $PTAI$ se résume alors à l'équation:

$$PTAI = \frac{X_0 + X_1}{2} \quad (2.5)$$

* Interpolation linéaire

Elle consiste à comparer les différents échantillons du front montant de l'impulsion au seuil PTH , à détecter les points M0 et M1 du signal situés respectivement juste avant et après le seuil. Par la suite, on détermine le polynôme du premier degré correspondant à ces points. Le calcul du $PTAI$ se résume alors à trouver la racine Xr de l'équation (2.6) correspondant à ce polynôme.

$$X_r : AX + B - PTH = 0 \quad (2.6)$$

* Interpolation du deuxième ordre

Elle consiste à comparer les différents échantillons du front montant de l'impulsion au seuil PTH , à détecter le point M0 du signal situé juste avant PTH et les deux points M1 et

M2 situés juste après. Par la suite, on détermine le polynôme du second degré correspondant à ces points. Le calcul du *PTAI* se résume alors à trouver la racine X_r de l'équation (2.7) comprise entre $X0$ et XI .

$$X_r : AX^2 + BX + C - PTH = 0 \quad (2.7)$$

* Spline cubique

Elle consiste à comparer les différents échantillons du front montant de l'impulsion au seuil *PTH*, à détecter le point M0 du signal situé juste avant *PTH* et les trois points M1, M2 et M3 situés juste après. Par la suite, on détermine le polynôme du troisième degré correspondant à ces points. Le calcul du *PTAI* se résume alors à trouver la racine X_r de l'équation (2.8) comprise entre $X0$ et XI .

$$X_r : AX^3 + BX^2 + CX + D - PTH = 0 \quad (2.8)$$

* Interpolation par suréchantillonnage

Le système de la figure 2.5 est un système de suréchantillonnage permettant d'obtenir, à l'aide d'un processus en temps discret, un interpolateur.

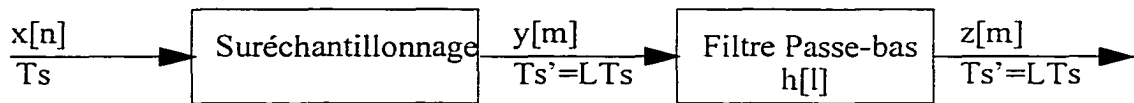


Figure2.5 Méthode de suréchantillonnage

Soit $x[n]$ le signal de période d'échantillonnage T_s à l'entrée du système. Si l'on augmente T_s d'un facteur de L en insérant $(L-1)$ zéros entre deux échantillons successifs, le nouveau signal $y[m]$ a une période d'échantillonnage T_s' et on obtient:

$$y[m] = \begin{cases} x\left[\frac{m}{L}\right] & m = 0, \pm L, \pm 2L, \pm 3L \dots \\ 0 & \text{Ailleurs} \end{cases} \quad (2.9)$$

et sa transformée en Z:

$$\begin{aligned} Y[z] &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} y(m) \times (z)^{-m} \\ &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(m) \times (z)^{-mL} \\ &= X(z^L) \end{aligned} \quad (2.10)$$

D'après cette dernière expression, le spectre en fréquence $Y(\omega_y)$ de $y[m]$ correspond à celui de $x[n]$, $X(\omega_x)$, répété à tous les $2\pi/L$ sur une échelle d'amplitude réduite de $1/L$. En enlevant les toutes images au dessus de $\omega_y = \pi/L$, nous pouvons donc retrouver le spectre original de x réduit de $1/L$. Pour cela, on fait passer la séquence $y[m]$ par un filtre passe-bas dont la réponse en fréquence est idéalement:

$$H[\omega_c] = \begin{cases} \frac{1}{L} & 0 \leq |\omega_y| \leq \frac{\pi}{L} \\ 0 & \text{Ailleurs} \end{cases} \quad (2.11)$$

Sa sortie $z[m]$ peut s'exprimer par:

$$z[m] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(m - kL) \times x(k) \quad (2.12)$$

On a les graphes de la figure 2.6 pour $L=3$. On a donc obtenu une interpolation de $x[n]$ à partir du système de la figure 2.5.

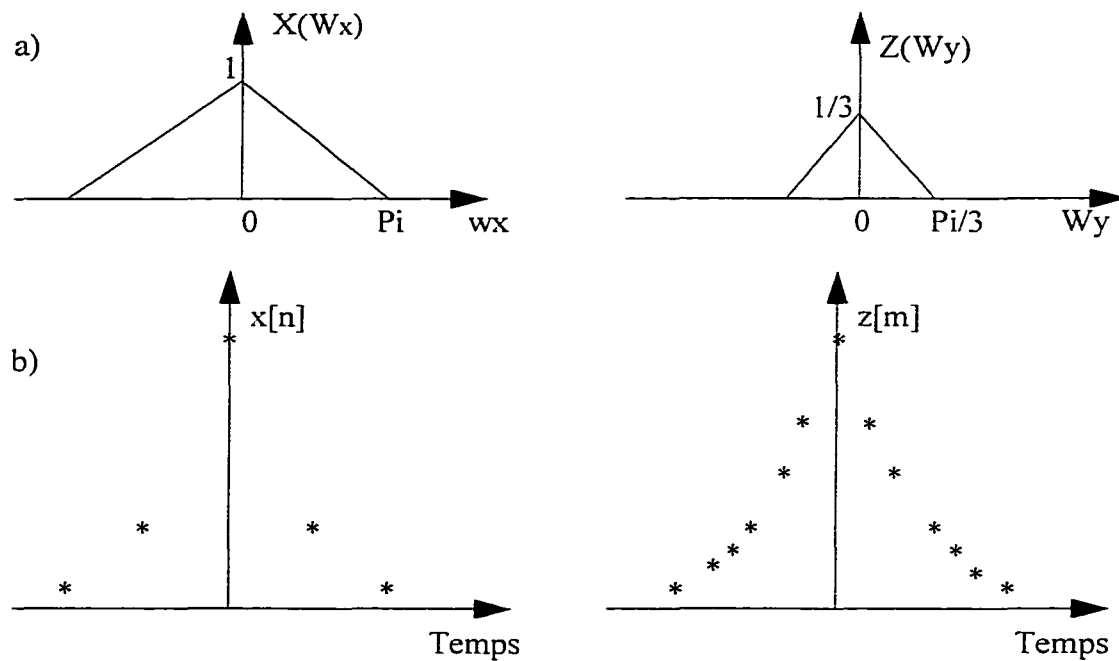


Figure 2.6 Suréchantillonnage avec $L = 3$

2.5.3.2 Résultats théoriques des méthodes

Parmi ces sept méthodes d'interpolation, celle qui aura donné de bons résultats par simulation sur MATLAB et permettra d'avoir une conception et réalisation matérielle acceptable sera celle à adopter. L'étude théorique des méthodes consiste à définir des signaux d'impulsions analogiques de formes semblables à celles fournies par le DREO (Defense Research Establishment Ottawa) considérées sortant d'un amplificateur logarithmiques, puis à déterminer leurs *PTAI* théoriques. Par la suite, on échantillonne ces signaux pour ensuite leur appliquer chacune des méthodes. Nous avons étudié 300 impulsions de 100 échantillons chacune. Après avoir calculé leur *PTAI* suivant chacune des méthodes, nous avons fait une moyenne d'erreur absolue relative entre ces valeurs calculées et les valeurs théoriques (avec signal analogique). Les résultats obtenus nous donnent l'histogramme de la figure 2.7.

Comparaison des méthodes

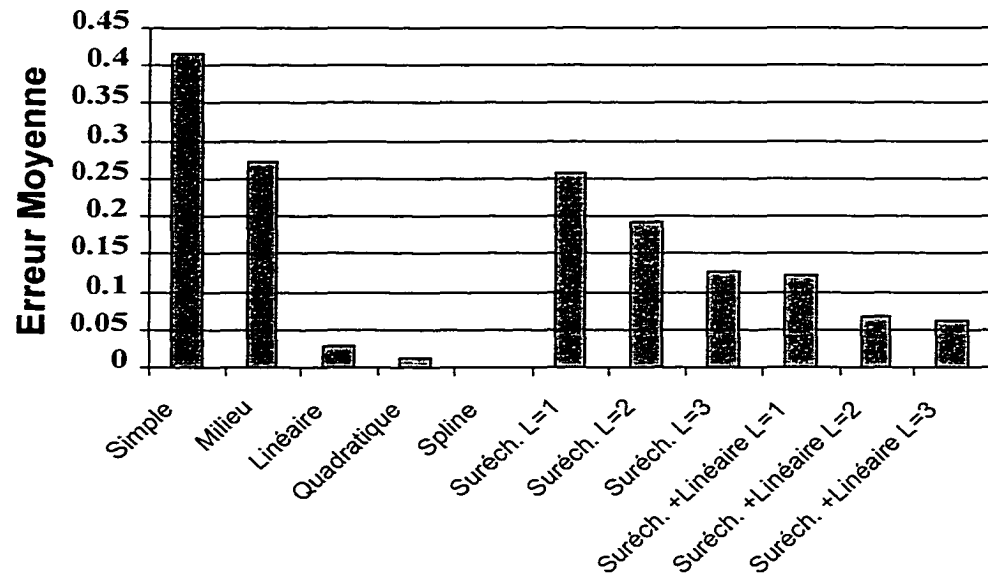


Figure 2.7 Histogramme des erreurs relatives des méthodes

L'analyse de ces résultats nous permet de conclure que la méthode de la spline cubique est la plus précise avec une moyenne d'erreur relative de l'ordre de $10^{-12}\%$. Cette méthode ne sera cependant pas sélectionnée puisqu'elle présente un coût très élevé du point de vue de sa conception numérique. En effet, elle requiert la résolution d'une équation du troisième degré. La deuxième méthode la plus précise est la quadratique avec une moyenne d'erreur relative de $10^{-8}\%$. Cette méthode à un coût de conception acceptable pourrait être adoptée pour le circuit. Les méthodes avec suréchantillonnage donnent des résultats très modestes pour des paramètres de suréchantillonnage inférieurs à 4 ce qui correspondrait à avoir une horloge de plus de 200 MHz. L'utilisation d'une fréquence d'horloge si élevée est très contraignante en conception numérique du circuit. Pour cette raison, les méthodes par suréchantillonnage ne seront pas retenues. La méthode de détection du milieu présente des résultats de précision assez médiocres de

28 %. Pour cette raison, elle ne sera pas retenue. Enfin, il reste à voir la dernière méthode, la linéaire. Elle donne des résultats satisfaisants avec une moyenne d'erreur relative de 2,8 %. Cette méthode paraît très intéressante d'autant plus qu'elle est peu coûteuse. En plus ces résultats sont suffisants compte tenu de la précision requise pour notre circuit (5 %).

En résumé, les méthodes qui ont des résultats de précision intéressants et qui présentent de bons avantages de coûts sont la méthode quadratique et la méthode linéaire. Cette analyse de coût versus précision se résume par le schéma de la figure 2.8.

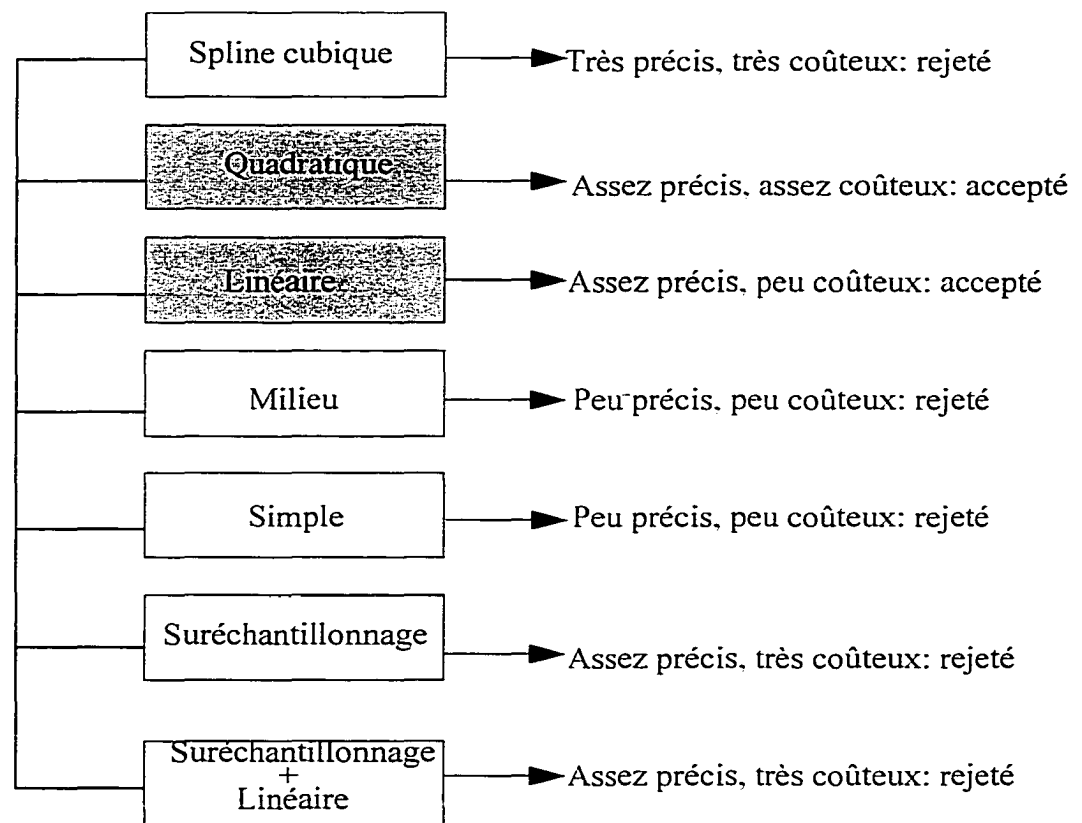


Figure 2.8 Schéma récapitulatif de l'analyse des méthodes

La recherche du choix de la méthode ne s'arrête pas aux résultats ci-dessus. Une étude plus poussée des deux méthodes sélectionnées est nécessaire pour déterminer la plus adéquate au circuit. En effet, dans l'analyse des méthodes, nous avons fait des approximations grossières des coûts de conception en fonction des notions de base des circuits numériques. Les deux méthodes sélectionnées ne sont tout de même pas de conception facile. La méthode quadratique nécessite une résolution d'équation du deuxième ordre tandis que la linéaire une division $PTAI = \frac{PTH - B}{A}$. Pour contourner cette difficulté, nous pouvons faire une approximation du $PTAI$ à partir du polynôme de chaque méthode. Cette approximation consiste à insérer N points équidistants P_0 à P_{N-1} dans l'intervalle $[X_0, X_1]$, à calculer les ordonnées de ceux-ci à l'aide du polynôme de la méthode, puis à comparer ces ordonnées au seuil PTH . Le premier point à partir de P_0 dont l'ordonnée est supérieure à PTH correspond à l'estimé de celui-ci (voir figure 2.9).

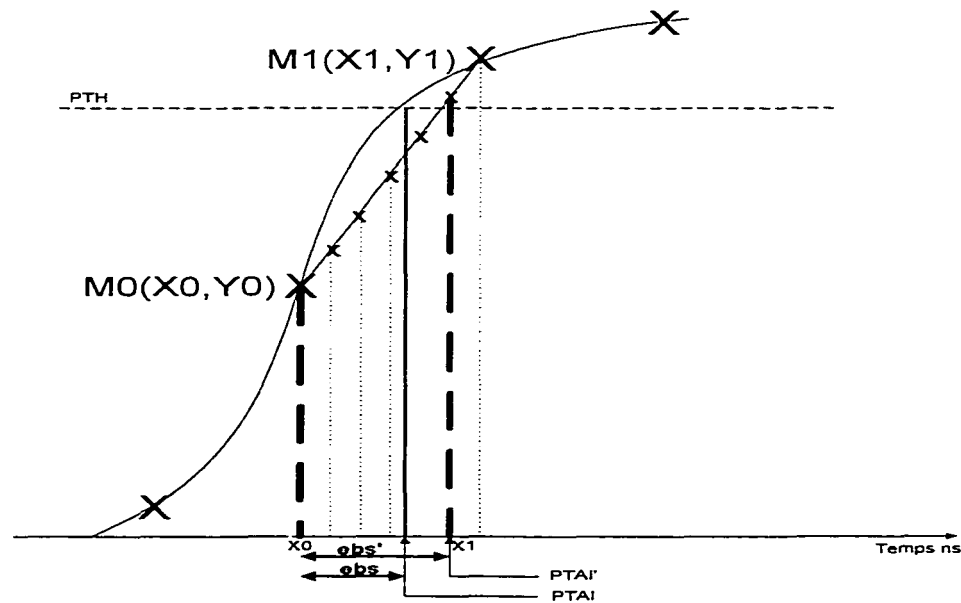


Figure 2.9 Méthode d'approximation du PTAI

Soient $\Delta X = \frac{1}{N}$ le pas de subdivision, Ebs la distance entre $X0$ et le $PTAI$, et

Ebs' son approximation, on a:

$$\begin{aligned} Ebs' &= K \times \Delta X \\ PTAI' &= X0 + Ebs' \\ &= X0 + K \times \Delta X \end{aligned} \quad (2.13)$$

d'où

$$PTAI' = X0 + \frac{K}{N} \quad (2.14)$$

A l'aide des impulsions utilisées précédemment, nous avons étudié l'influence de l'approximation par subdivision sur la précision des méthodes sélectionnées en faisant varier N . Cette étude faite sur MATLAB nous donne les courbes théoriques de la figure 2.10. On remarque que pour ces fonctions, l'erreur relative diminue quand N augmente. On voit aussi que quelque soit N , la fonction quadratique donne de meilleurs résultats que la linéaire bien que l'écart de précision reste faible pour ce type d'impulsions.

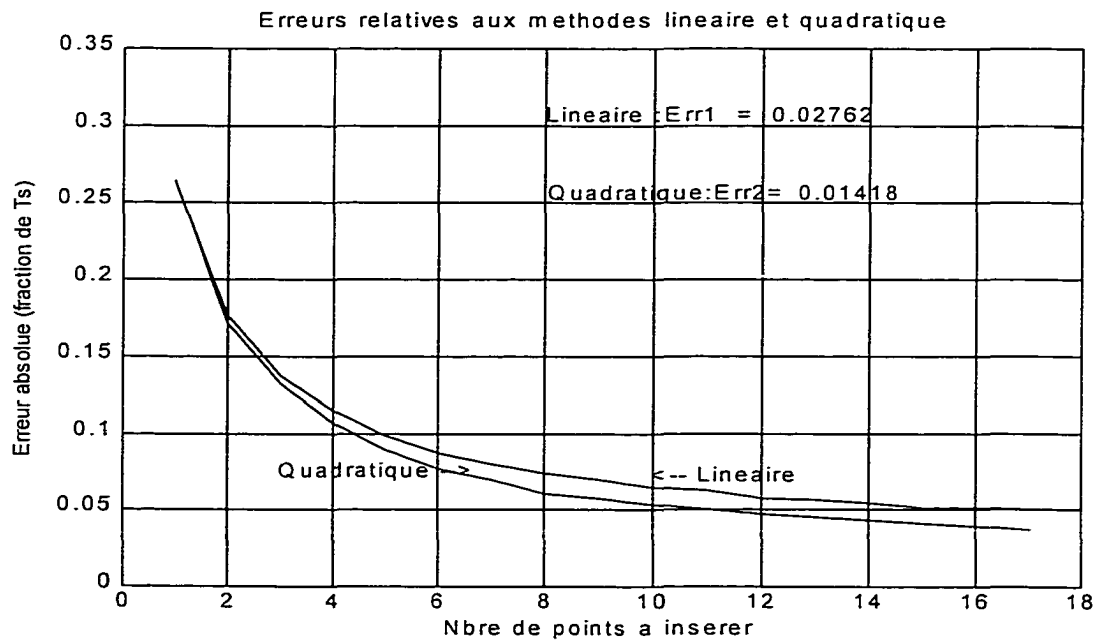


Figure 2.10 Courbes de comparaison de la précision versus N

Suite à cette étude théorique, nous avons fait l'entrée schématique des modèles de ces méthodes (interpolation suivie d'une approximation par subdivision) sur Viewlogic. Le calcul de la complexité en nombre de portes par rapport à N permet d'obtenir les courbes de la figure 2.11. On constate que pour les deux modèles, la complexité du circuit augmente avec le nombre de points à insérer N . Cependant pour un N donné, le modèle de la quadratique nécessite en général deux fois plus de portes que celui de la linéaire. Ceci peut s'expliquer par le fait que par rapport au modèle de la linéaire, le modèle quadratique requiert plus d'opérations pour le calcul des ordonnées des N points ($Y = AX^2 + BX + C$ par rapport à $Y = AX + B$).

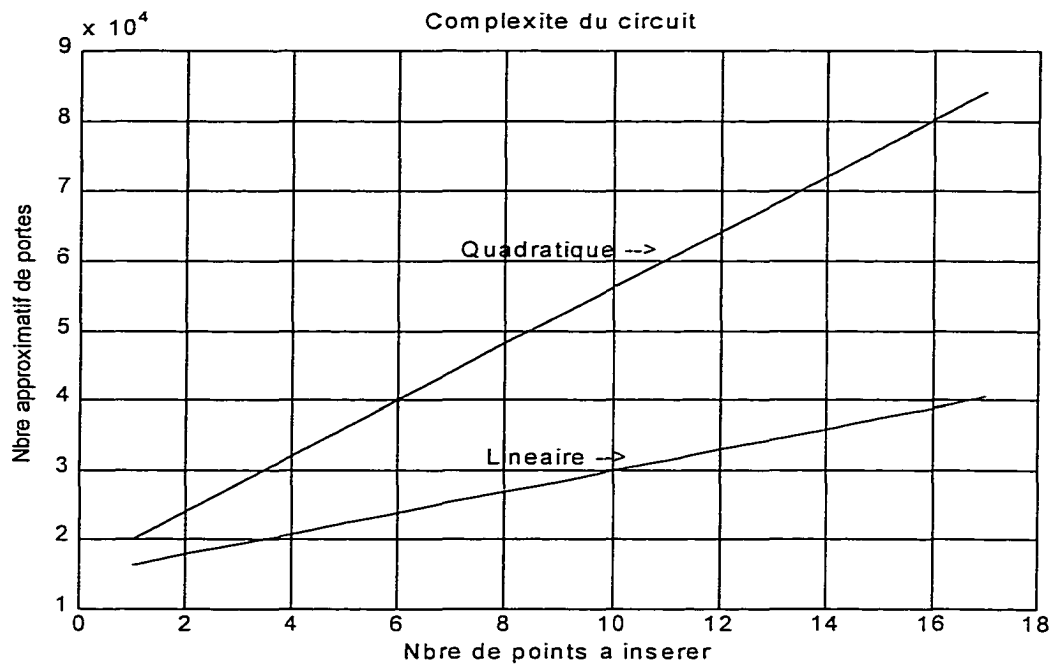


Figure 2.11 Courbes de comparaison de la complexité versus N

En reliant les résultats des courbes des figures 2.10 et 2.11, nous avons obtenus les courbes de comparaison de la complexité versus la précision des deux types de modèles illustrées à la figure 2.12.

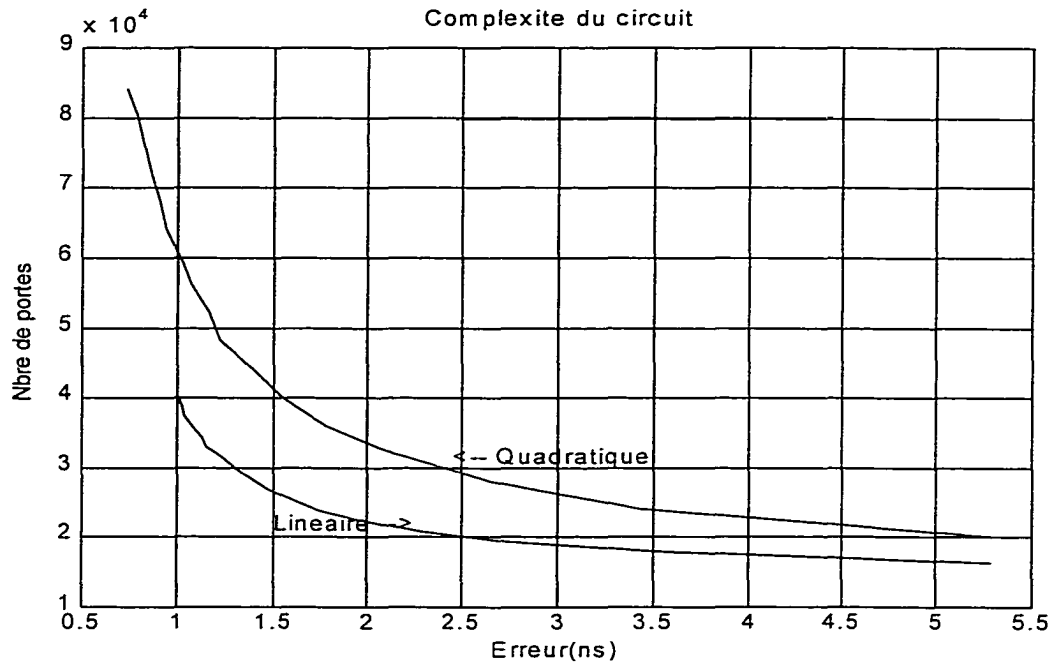


figure 2.12 Courbes de comparaison de la complexité versus la précision

On constate que pour une précision donnée, le modèle quadratique utilise plus de portes que celui du modèle linéaire. L'un des principaux critères d'un bon design étant l'obtention d'un bon rapport Précision/Coût, nous sommes tentés de dire que la méthode linéaire est plus apte à remplir nos besoins. Vérifions cette affirmation par un exemple plus explicite.

Dans le mandat de notre projet, il nous a été demandé d'obtenir pour notre circuit des calculs de paramètres avec une précision de l'ordre de 1 ns. Pour une horloge de 50 MHz, cela équivaut à une erreur de 0,05 période d'horloge. D'après les courbes de la figure 2.10, il serait approprié de choisir $N \geq 12$ pour le modèle quadratique et $N \geq 15$ pour le linéaire. Pour ces différentes valeurs de N , on obtient respectivement pour la quadratique et la linéaire environ $6,5 \cdot 10^4$ et $3,7 \cdot 10^4$ portes logiques. On voit

que la méthode quadratique présente un rapport Coût/Précision beaucoup plus faible que la linéaire. Pour un N égal à 16, cette dernière présente des résultats tout à fait satisfaisants pour notre circuit ($0.035 Ts$). On conclut qu'on adoptera pour la conception de notre circuit la méthode linéaire avec N égal à 16.

2.6 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de décrire les différents blocs fonctionnels du circuit ainsi que leurs signaux d'entrée/sortie. Nous avons vu que l'estimateur était composé d'un circuit d'interpolation qui d'après des résultats théoriques de performance versus coût devrait utiliser une méthode d'interpolation linéaire avec approximation par subdivision de l'intervalle $[X0, XI]$ pour $N = 16$.

CHAPITRE III

CONCEPTION DU CIRCUIT SUR VIEWLOGIC

3.1 Introduction

Suite à la description de l'architecture et du fonctionnement du circuit, nous allons procéder à la description détaillée de sa conception sur le logiciel de conception et de simulation Viewlogic. La conception des circuits numériques est un travail très exigeant qui demande la maîtrise des composants à utiliser et une bonne connaissance des circuits numériques. En effet, le bon fonctionnement logique d'un circuit en simulation n'implique pas toujours qu'il est réalisable. Il existe des facteurs physiques limitatifs qui influencent grandement ses performances. Ces facteurs qui se révèlent seulement après le placement et le routage, doivent être considérés lors de la réalisation de l'entrée schématique du circuit afin d'éviter d'avoir de mauvaises surprises.

Ce présent chapitre nous permet de décrire les différentes étapes de la conception du détecteur/estimateur. Il présente aussi les résultats de simulation obtenus à partir de Viewlogic. Nous y traitons aussi de la mise en oeuvre du circuit avec le logiciel Mi2.1. Avant d'aborder ces différents thèmes, il serait intéressant d'expliquer notre choix de technologie utilisée lors de la réalisation du circuit.

3.2 Technologie utilisée

Notre choix de technologie s'est porté sur la famille Virtex de Xilinx en raison des solutions de logiques programmables de haute capacité et de grandes performances qu'offre leurs FPGA. Ceux-ci présentent une densité comprise entre 50,000 et 1 million de portes logiques avec une vitesse atteignant 200 MHz. Ils regroupent une grande hiérarchique de mémoires reconfigurables de type SRAM sous forme de blocs de mémoires dédiés. Ils présentent aussi une architecture flexible et régulière avec une matrice de blocs logiques configurables (CLB) entourée par des blocs d'entrée/sortie (IOB) programmables tous interconnectés par des ressources de placement-routage très rapides. Tout ceci permet une grande optimisation de l'architecture des circuits.

3.3 Signatures des signaux et contraintes du circuit

Les signaux d'entrée/sortie du circuit doivent respecter des signatures binaires spécifiques. Ce circuit doit pouvoir fonctionner à une fréquence de 50 MHz avec une latence maximale de 10 périodes d'horloge pour le circuit de détection.

* Signatures des signaux d'entrée-sortie

Tableau 3.1

Signatures des signaux d'entrée-sortie

| Signaux | Nbre de bits |
|--|--------------|
| <i>Reset, Begin, PDebut, PValide, PFin</i> | 1 |
| <i>MH</i> | 2 |
| <i>Data, PGain</i> | 8 |
| <i>PLargeur</i> | 12 |
| <i>PTAI</i> | 24 |

*** Nombre minimal d'échantillons à valider : MH**

Le tableau 3.2 résume la relation entre MH et le nombre minimum d'échantillons successifs supérieurs à THI nécessaire pour valider une impulsion.

Tableau 3.2

Correspondance entre MH et le nombre minimum d'échantillons à valider

| Nbre de bits | 00 | 01 | 10 | 11 |
|---------------------|----|----|----|----|
| Nbre d'échantillons | 1 | 2 | 3 | 4 |

***Fréquence de fonctionnement du circuit**

Le circuit doit rester fonctionnel à une période d'horloge de 50 MHz.

*** Délai de traitement**

C'est le temps mis entre la détection du premier échantillon valide et l'envoi de la commande $PTAI$ vers le système informatique. Ce délai est de 10 périodes d'horloge soit 200 ns pour notre circuit de 50 MHz.

3.4 Description des blocs fonctionnels du circuit

Le schéma du détecteur/estimateur est composé de 4 blocs qui sont: *entrées détecteur*, *estimateur* et *sorties*. Les blocs *entrées* et *sorties* regroupent les ports d'entrée et sortie des signaux. Leurs descriptions n'étant pas pertinentes, nous n'allons pas nous y attarder. Les deux parties importantes de notre circuit sont les blocs *détecteur* et *estimateur*. Le bloc *détecteur* détecte les fronts montant et descendant des impulsions et détermine leurs amplitudes maximales, et le bloc *estimateur* calcule leur temps d'arrivée et leur largeur. Ces 2 blocs qui seront présentés progressivement dans ce chapitre. Les schémas des différents blocs et sous-blocs sont présentés en annexe A.

3.4.1 Détecteur

Il comprend quatre parties principales : *Détecte_Début&Validation*, *Détecte_Max*, *Générateur_Gain* et *Détecte_Fin*.

3.4.1.1 Détecte_Début&Validation

Le *Détecte_Début&Validation* détecte le début des impulsions. Pendant le front montant d'une impulsion, il compare chaque échantillon au premier seuil *TH1* à l'aide d'un comparateur de type COMPMC8. Le premier échantillon supérieur à *TH1* génère un signal de début d'impulsion, *PDebut*. Ce signal est envoyé au système informatique un coup d'horloge après l'échantillon qui le génère. Lorsque *MH+1* échantillons successifs sont supérieurs au seuil, un signal *Val* est généré pour valider l'impulsion. Si on a un nombre *X* (inférieur ou égal à *MH*) d'échantillons successifs supérieurs au seuil et qu'un échantillon tombe en dessous, un signal *Reset_TH1* est généré pour réinitialiser tous les processus du circuit. On suppose que les échantillons valides précédemment détectés sont dus au bruit et qu'un vrai front montant n'a pas été détecté. On réduit ainsi le taux de fausses alarmes. Après la détection d'une vraie impulsion, le signal *PValide* représentant *Val* retardé de *5-MH* coups d'horloge est envoyé à l'atténuateur. Ce retard permet une synchronisation entre la détection du front montant d'une impulsion et sa validation. Ainsi quelle que soit la valeur d'un nombre d'échantillons *MH+1* nécessaires pour valider une impulsion, il y a 5 périodes d'horloge entre la détection du premier échantillon du front montant et l'envoi de *PValide*. Le choix du délai entre *Val* et *Valide* est effectué par une série de registres FD et d'un multiplexeur de type M4_1E.

3.4.1.2 Détecte_Max

Le *Détecte_Max* est la partie du *Détecteur* qui détecte le maximum de l'impulsion (partie supérieure du schéma du *Détecteur*). A l'aide d'un comparateur

COMPMC8 et d'un registre FD8RE, il compare chaque échantillon du front montant au maximum actuel, Max . Si l'amplitude, $Data(n)$, du dernier échantillon est supérieure à Max , sa valeur est chargée, on obtient $Max = Data(n)$. Par contre, si $Data(n)$ est inférieure à Max , Max reste inchangé. On continue la comparaison jusqu'à ce que l'impulsion soit validée c'est-à-dire jusqu'à génération du signal Val . C'est la valeur de Max à ce moment qui représente l'amplitude maximale de l'impulsion et qui sera utilisée pour la détermination de ***PGain***.

3.4.1.3 Générateur_Gain

Cette partie du détecteur permet de calcul la valeur du gain ***PGain*** à appliquer à l'impulsion à partir de la valeur de son amplitude maximale, Max . Le gain et l'amplitude sont liés par une relation qui nous est inconnue. Pour les tests de notre circuit, nous prendront le gain égal à la valeur de l'amplitude maximale. Les différentes valeurs possibles de ce gain sont données en annexe B. La valeur du gain est lue dans une RAM de type RAMB4_16 adressée par le bus $Max[12:4]$. Ce bus représente l'amplitude maximale du signal sur 8 bits. ***PGain*** est envoyé à l'atténuateur au même moment que ***PValide***.

3.4.1.4 Détecte_Fin

Le bloc ***Détecte_Fin*** sert à détecter le front descendant de l'impulsion dite valide. Pendant le front descendant d'une impulsion, il compare chaque échantillon au deuxième seuil $TH2$ à l'aide d'un comparateur de type COMPCM8. Le premier échantillon d'amplitude inférieure à $TH2$ génère un signal ***PFin*** indiquant la fin de l'impulsion. ***Pfin*** est envoyé au système informatique une période d'horloge après l'entrée de l'échantillon qui le génère.

3.4.2 Estimateur

Il comprend six sous-blocs : *Hi_Seuil*, *Sup_Seuil*, *DéteceY0&Y1*, *Li_Seuil*, *PTAI* et *PLargeur*.

3.4.2.1 Hi_Seuil

Pour chaque impulsion validée, ce bloc calcule le seuil *PTH* utilisé pour l'estimation de son *PTAI*. Rappelons que *PTH* est calculé à partir de l'amplitude maximale de l'impulsion *PDmax* par l'équation 2.3. Le paramètre *V* de l'amplificateur logarithmique que nous allons utiliser est égal à 0.75 volt. D'après cette équation, le seuil d'impulsion est donné par :

$$PTH \cong PDmax - 0,75 \log 2 \quad (3.1)$$

Ce seuil *PTH[11:0]* est codé sur 12 bits dont les 8 premiers pour la partie entière et 4 derniers pour la partie décimale. Ce bloc permet aussi de déterminer les résultats de comparaison *Hi[31:0]* des points du front montant par rapport au seuil. Pendant un processus de détection d'impulsion valide (jusqu'à la validation d'une impulsion), les points du front montant sont stockés en série dans une chaîne de 32 registres FD16CE. Après validation de l'impulsion et le calcul de son seuil *PTH*, les amplitudes de ces points sont comparées à *PTH* de manière parallèle. Les résultats de comparaison *Hi[31:0]* sont envoyés au bloc suivant *SupSeuil*. Le bus *Hi[31:0]* permet de calculer le nombre de points au-dessus de *PTH*. Le choix des 32 registres de points s'est fait en tenant compte du nombre maximum de points possibles sur le front montant des impulsions fournies par le DREO. D'après leur analyse, on constate que les temps de montée sont très courts. Le nombre maximal d'échantillon pendant ce temps reste toujours inférieur à 20.

3.4.2.2 SupSeuil

Ce bloc calcule le nombre d'échantillons $SupSeuil[4:0]$ au-dessus du seuil PTH . C'est un genre de codeur qui, en fonction de la position du premier bit de $Hi[31:0]$ égal à 1, détermine le nombre d'échantillons du front montant au-dessus de PTH . On considère qu'un échantillon $P[n]$ est au-dessus du seuil si au moins un $Hi[n-i]$ est égal à 1 (avec $i \geq 0$). La table de vérité d'un codeur de ce type est donnée en annexe C. La valeur du bus $SupSeuil[4:0]$ est ensuite acheminée au bloc *detecteY0&Y15*. Il existe 5 périodes d'horloge entre les générations des signaux *val* et *SupSeuil*.

3.4.2.3 Detecte Y0&Y1

Ce bloc détecte les points $M0$ et $M1$ situés juste avant et juste après PTH qui serviront au calcul de $PTAI$ par interpolation linéaire et approximation par subdivision. Dans deux mémoires $RAM0$ et $RAM1$ de type $RAM32X8S$, on stocke progressivement l'amplitude des échantillons du front montant jusqu'à la validation de l'impulsion (génération du signal *val*). Un compteur $CB8RE$ qui s'incrémente à chaque coup d'horloge définit l'adresse successive de chaque échantillon dans $RAM0$ et $RAM1$. Après validation de l'impulsion et calcul du nombre d'échantillons $SupSeuil[4:0]$ au-dessus de PTH , on calcule les adresses des amplitudes $Y0$ et $Y1$ des 2 points à partir de la valeur de ce compteur et de celle de $SupSeuil[4:0]$. D'après la figure 2.9, on a :

$$AdrY0 = CptY - SupSeuil \quad (3.2)$$

$$AdrY1 = CptY - SupSeuil + 1 \quad (3.3)$$

Ces adresses permettent de lire les amplitudes $Y0$ et $Y1$ des deux points à partir de $RAM0$ et $RAM1$. Ces valeurs lues sont ensuite acheminées au bloc *PTAI*. $Y0$ et $Y1$ sont générés 7 périodes d'horloge après *Val*.

3.4.2.4 Li_Seuil

Ce bloc calcul fournit les résultats de comparaison des 16 points obtenus par la subdivision de l'intervalle $[X0, X1]$ et le seuil PTH . Ces résultats $Li[15:0]$ servent au calcul de 4 derniers bits du $PTAI$. Sur la figure 2.9, ce bus correspond à Ebs' . Le processus de son calcul comprend plusieurs étapes qui sont :

- calcul des coefficients A et B du polynôme du premier degré,
- subdivision de l'intervalle $[X0, X1]$ en $N=16$ sous intervalles et calcul des ordonnées des points correspondants,
- comparaison des valeurs de ces ordonnées au seuil PTH .
- calcul du nombre de points $PTAI[3:0]$ (Ebs') de la subdivision situés au-dessus de PTH .

$M0$ et $M1$ étant deux points successifs, A et B représentent les coefficients de la droite passant par les points $M0(0, Y0)$ et $M1(1, Y1)$. On a donc : $A = Y_1 - Y_0$ et $B = Y_0$. Le calcul de $PTAI[3:0]$ en utilisant la formule $AX + B \geq PTH$ est traduite par trois niveaux d'opérations en série (AX , $AX+B$ et $AX+B \geq PTH$). Pour réduire le nombre des niveaux d'opérations en série et ainsi augmenter la vitesse de calcul de $Li[15:0]$ donc du circuit, on peut utiliser à la place de la formule ci-dessus, la formule $AX \geq PTH - B$. Le calcul des deux termes de la comparaison peut alors se faire en parallèle et on a donc deux niveaux d'opérations au lieu de trois. Dans notre circuit les valeurs de AX_i (i allant de 1 à 15) des 15 points du sous-intervalle sont lues en parallèle dans des RAM $RAMX_i$ de type $RAMB4_S16$ adressées par les valeurs de A . Ces RAM jouent le rôle de tables de correspondance de A avec AX_i . Les comparaisons des AX_i avec $PTH-B$ sont faites à l'aide de 15 comparateurs $COMPMC16$. Les résultats de comparaisons des points intermédiaires constituent un bus de 15 bits $L[14:0]$. $L15$ est le résultat de comparaisons du point $Y0$ et du seuil. On sait d'office que $Y0$ est inférieur au seuil ce qui fait que $L15$ est toujours égal à 0. $Li[15:0]$ est envoyé au bloc $PTAI$ pour le calcul de $PTAI[3:0]$ 7 périodes d'horloge après Val .

3.4.2.5 PTAI

Ce bloc calcule le temps d'arrivée de l'impulsion donné par le bus $PTAI[23:0]$. Le bus $PTAI[23:0]$ est composé de deux bus $PTAI[23:4]$ et $PTAI[3:0]$. Comme il a été dit plus tôt, $PTAI[3:0]$ est calculé à partir de la valeur du bus $Li[15:0]$. À l'aide d'un codeur de '1' de type X74_14BN et ce bus, on obtient le nombre de points $PTAI[3:0]$ compris dans l'intervalle $[X0, X1]$ et supérieurs au seuil PTH .

Sur la figure 3.10, $PTAI[23:4]$ correspond à $X0$. La valeur de $X0$ est déterminée à partir d'un compteur de type CB20RE, de 2 registres FD20CE et d'un soustracteur ADSU20x1 de 20 bits. Ce compteur est initialisé par la commande d'entrée du circuit *Begin*. Il définit le temps d'arrivée de tous les échantillons entrés dans le circuit par rapport à ce signal. Le compteur compte l'abscisse des échantillons entrés jusqu'au dernier échantillon de validation de l'impulsion. Le soustracteur soustrait ensuite cette valeur au nombre d'échantillons au-dessus du seuil. La valeur obtenue est celle de $X0$. $PTAI$ est généré 10 périodes d'horloges après *Val*. Ceci revient à 11, 12, 13 et 14 périodes d'horloge entre l'entrée du premier échantillon au dessus de THI et l'envoi de $PTAI$ respectivement pour MH égale à 0, 1, 2 et 3. Ceci revient à une latence maximale de 14 périodes d'horloge.

3.4.2.6 PLargeur

Ce bloc calcule la largeur $PLargeur[11:0]$ des impulsions valides. Celle-ci est déterminée par un compteur CB12RE de 12 bits nommé $CPT_PLargeur$ initialisé par $PDebut$ et arrêté par $PFin$. Le signal $PLargeur$ est envoyé au même moment que $PFin$.

Cette description de conception termine celle de l'entrée schématique du circuit détecteur/estimateur. Afin de valider le fonctionnement logique du circuit, des simulations sur Viewlogic ont été ensuite effectuées.

3.5 Simulations

La simulation sur Viewlogic consiste à varier les signaux d'entrée du circuit et à vérifier la logique à partir des valeurs des signaux de sortie de chaque sous-blocs. Les RAMB4_16 de Virtex n'étant pas simulables, nous n'avons pas pu simuler la partie *PTAI* de l'estimateur. Les signaux *MH*, *TH1*, *TH2* et *Begin* du circuit et le flux numérique de données d'échantillons, *Data* ont été définis dans un fichier de commande .cmd (voir annexe E). *Data* est un flux de données de 10 impulsions comprenant 16 échantillons chacune. Les impulsions utilisées sont illustrées à la figure 3.1. Six simulations ont été faites. Les paramètres de simulation sont définis au tableau 3.3.

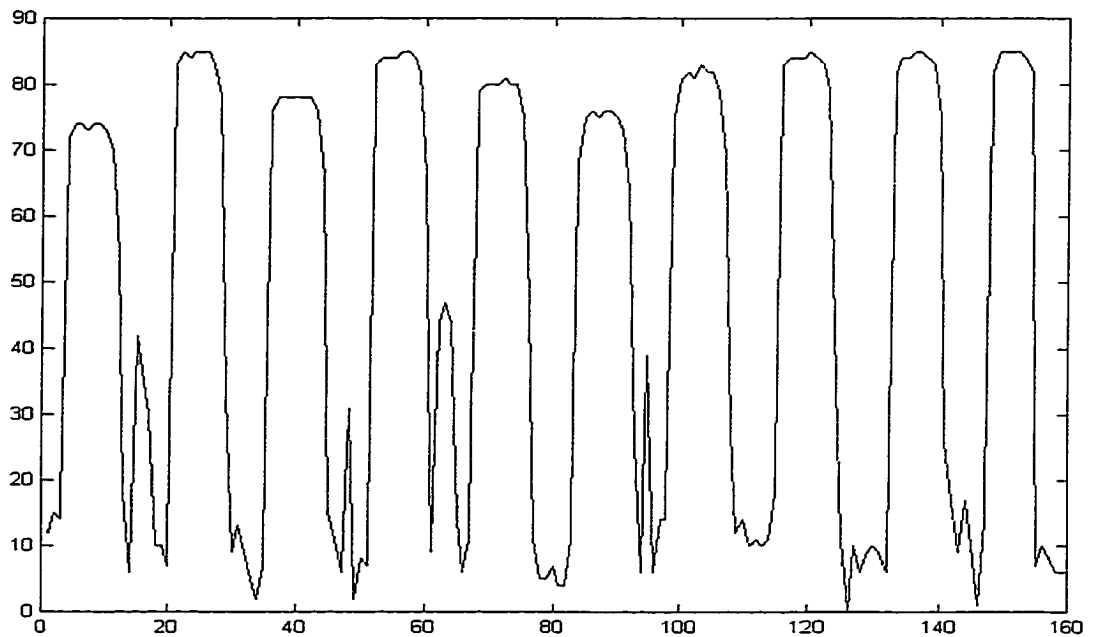


Figure 3.1. Impulsions simulées

Tableau 3.3
Paramètres de simulation

| Simulation | <i>TH1</i> | <i>TH2</i> | <i>MH</i> |
|------------|------------|------------|-----------|
| #1 | 20 | 10 | 0 |
| #2 | 40 | 10 | 0 |
| #3 | 75 | 10 | 0 |
| #4 | 20 | 10 | 2 |
| #5 | 40 | 10 | 2 |
| #6 | 75 | 10 | 2 |

Les simulations sur MATLAB donnent le tableau 3.4 (fichier de simulation, voir annexe F) avec *NDval* celui de détections validées, *ND* le nombre de bonnes détections, *NDm* celui de détections manquées et *Nfa* celui de fausses alarmes. Les simulations sur Viewlogic donnent les figures 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 et 3.7.

Tableau 3.4
Résultats de simulation sur MATLAB

| | <i>NDval</i> | <i>ND</i> | <i>NDm</i> | <i>NFa</i> | <i>Pd (%)</i> | <i>Pm (%)</i> | <i>Pfa (%)</i> |
|----|--------------|-----------|------------|------------|---------------|---------------|----------------|
| #1 | 13 | 10 | 0 | 3 | 100 | 0 | 23,07 |
| #2 | 11 | 10 | 0 | 1 | 100 | 0 | 9,09 |
| #3 | 8 | 8 | 2 | 0 | 80 | 20 | 0 |
| #4 | 11 | 10 | 0 | 1 | 100 | 0 | 9,09 |
| #5 | 10 | 10 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 |
| #6 | 7 | 7 | 3 | 0 | 70 | 30 | 0 |

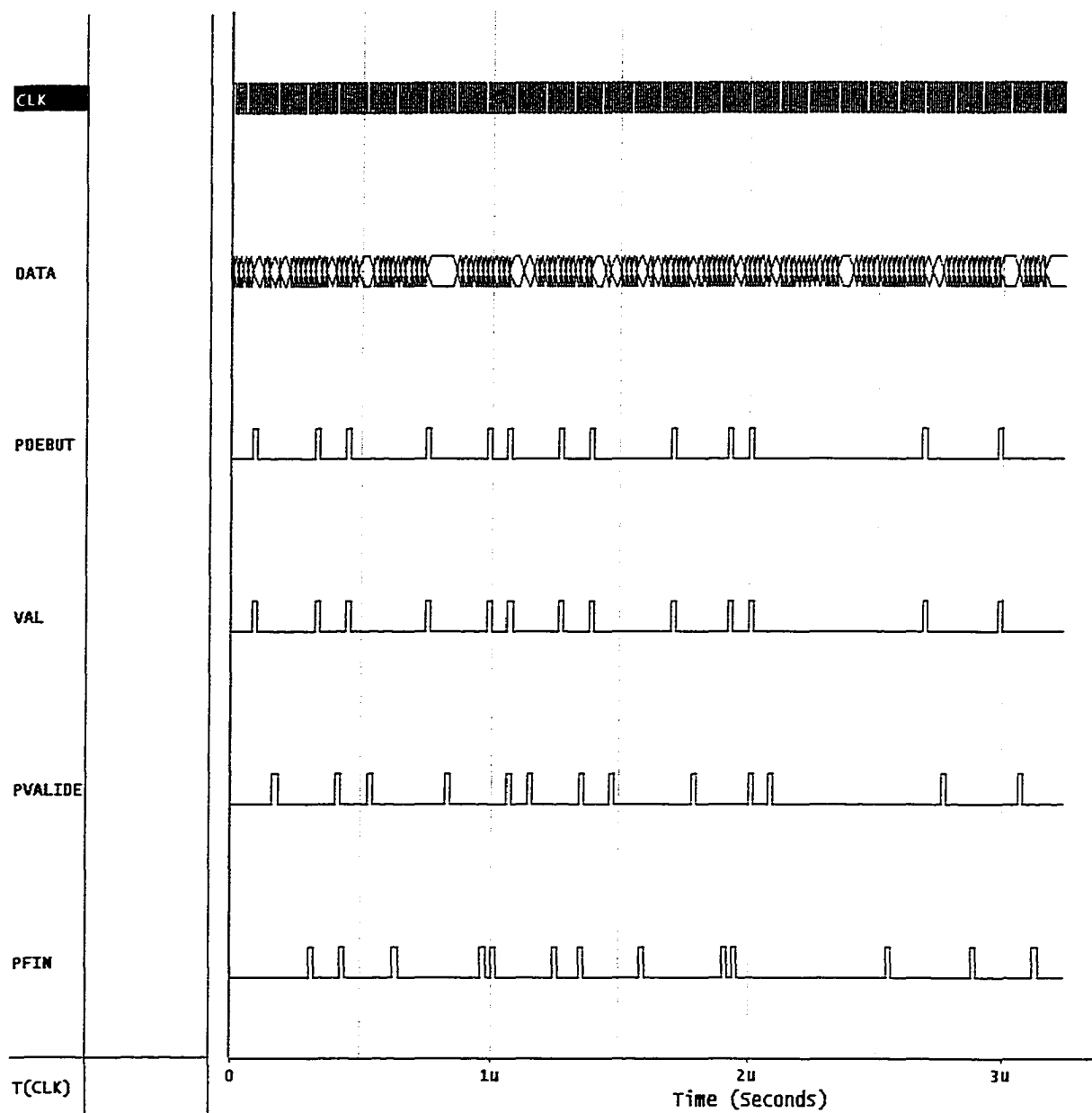


Figure 4.2. Simulation #1 sur Viewlogic avec MH=0, TH1=20 et TH2=10

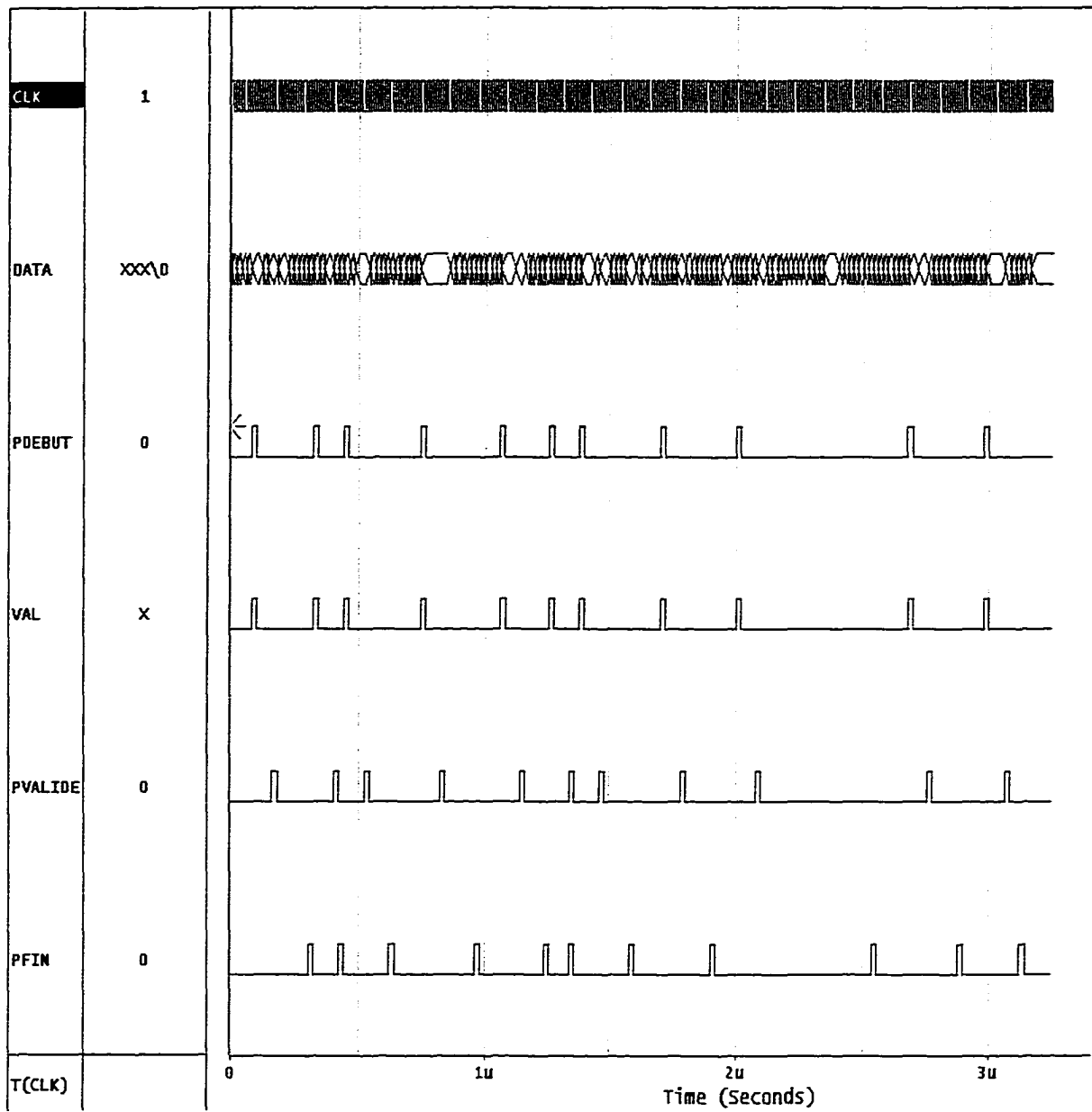


Figure 4.3. Simulation #2 sur Viewlogic avec MH=0, TH1=40 et TH2=10

NOTE TO USERS

Page(s) not included in the original manuscript and are unavailable from the author or university. The manuscript was microfilmed as received.

51-54

This reproduction is the best copy available.

UMI[®]

L'analyse des résultats de simulations sur Viewlogic permet d'obtenir le tableau 3.5.

Tableau 3.5
Résultats de simulations obtenus sur Viewlogic

| | <i>NDval</i> | <i>ND</i> | <i>NDm</i> | <i>NFa</i> | <i>Pd (%)</i> | <i>Pm (%)</i> | <i>Pfa (%)</i> |
|----|--------------|-----------|------------|------------|---------------|---------------|----------------|
| #1 | 13 | 10 | 0 | 3 | 100 | 0 | 23,07 |
| #2 | 11 | 10 | 0 | 1 | 100 | 0 | 9,09 |
| #3 | 8 | 8 | 2 | 0 | 80 | 20 | 0 |
| #4 | 11 | 10 | 0 | 1 | 100 | 0 | 9,09 |
| #5 | 10 | 10 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 |
| #6 | 7 | 7 | 3 | 0 | 70 | 30 | 0 |

On constate que les tableaux sur Matlab et Viewlogic sont identiques. Ceci nous confirme le bon fonctionnement du circuit par rapport à la logique programmée. Ces résultats permettent à nouveau d'observer les relations qui lient le seuil de détection *THI*, *MH*, le bruit, *Pd* et *Pfa*. On voit que pour un seuil proche de la valeur moyenne du bruit *Pfa* est grande (simulation #1 : *Pfa* = 23,07%). Cette probabilité diminue lorsqu'on augmente *THI* (simulation #2 : *Pfa* = 9,09%, simulation #6 : *Pfa* = 0%). On voit aussi à la simulation #3 que le fait de prendre un seuil de détection trop grand diminue la probabilité de détection (*Pd* tombe à 80%). En effet, la détection des impulsions d'amplitude moyenne est manquée. Pour minimiser *Pfa* et obtenir un bon *Pd*, il faut donc fixer un seuil *THI* au-dessus de la moyenne du bruit et mais pas trop grand par rapport à la moyenne d'amplitude du signal avec un *MH* acceptable. En effet, on observe aussi que l'augmentation de *MH* diminue *Pfa* mais peut augmenter *Pm*. L'équation 1.5 pourrait être utilisée pour l'approximation de *THI*. Ces résultats satisfaisants valident tout l'algorithme utilisé pour le circuit.

3.6 Mise en oeuvre du circuit

L'outil de mise en oeuvre utilisé est le logiciel M2.1. Sa fonction consiste à effectuer le partitionnement, le Placement/Routage et la synchronisation des blocs du circuit. Ces opérations sont essentielles à la poursuite du projet puisqu'elles vérifient la bonne fonctionnalité du circuit, fournissent ses caractéristiques physiques et de créent le fichier .mcs nécessaire à son implantation sur FPGA.

3.6.1 Choix du FPGA

Avant de décrire ces opérations de la mise en oeuvre, il serait très important de définir les caractéristiques du FPGA utilisé. Rappelons que celles-ci ont été choisies en fonction des contraintes imposées pour le circuit et des performances physiques que présente le FPGA choisi. Ces caractéristiques sont résumées aux tableaux 3.6 et 3.7.

Tableau 3.6
Type de FPGA utilisé

| Famille | Device | Package | Grade de vitesse |
|---------|--------|---------|------------------|
| Virtex | XCV600 | HQ240 | -5 |

Tableau 3.7
Caractéristiques du FPGA utilisé

| Portes | LCA | CLBs | I/O maximum | Bits de RAM |
|---------|-------|--------|-------------|-------------|
| 661 111 | 48x72 | 15 552 | 512 | 98 304 |

3.6.2 Processus de mise en oeuvre

À partir du fichier .sch de l'entrée schématique, un fichier .edn est créé. Celui-ci est par la suite converti en fichier .xpf qui, lui est associé à un fichier de contraintes .ucf pour effectuer la mise en oeuvre proprement dite du circuit. La contrainte du circuit à respecter pour cette suite d'opérations est celle de la fréquence de fonctionnement de 50 MHz à atteindre. La mise en oeuvre du circuit regroupe cinq étapes principales (voir figure 3.8). Ce sont la Traduction (ou Translate en anglais), le Partitionnement (ou Map), le Placement&Routage, la synchronisation (ou Timing) et la Configuration.

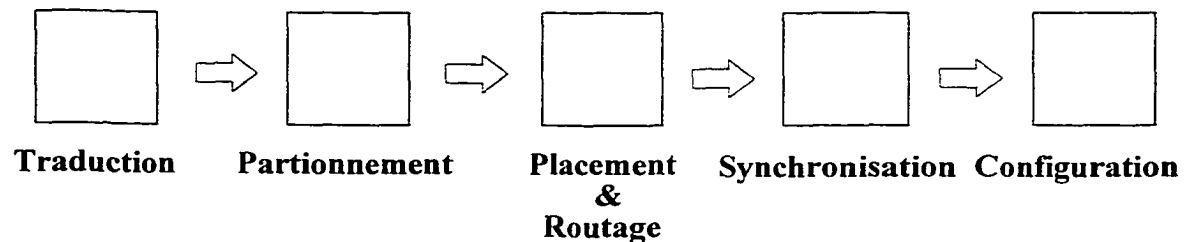


Figure 3.8. Opérations de mise en oeuvre

La traduction du schéma du circuit est l'étape qui permet de regrouper les blocs logiques du circuit en CLBs et de faire une vérification fonctionnelle du circuit. L'étape de partitionnement optimise l'étape précédente en supprimant toutes les parties de logiques inutiles. Elle fournit les renseignements sur le taux d'occupation des différents éléments du LCA et les caractéristiques logiques du circuit tel le délai logique (sans routage). On passe ensuite à l'étape du Placement-Routage. Cette opération est capitale pour les performances du circuit car c'est elle qui détermine réellement la vitesse de fonctionnement. Elle consiste à positionner les CLBs en fonction des broches d'Entrée/Sortie de sorte à minimiser les délais de connexion des blocs. Il est donc très important de bien situer ces broches. L'analyse de la synchronisation permet de vérifier les chemins critiques et de localiser les points faibles du circuit afin d'y apporter des

améliorations. Les listings des résultats de la mise en oeuvre du circuit sont donnés en annexe G. Le récapitulatif de ces résultats donné par le tableau 3.8 montre bien que le circuit réalisé remplit la contrainte d'horloge. En effet, avec une fréquence maximale de 56.9 MHz, le circuit peut fonctionner à 50 MHz. Les latences maximale du détecteur et du circuit total sont respectivement de 5 et 14 périodes d'horloge. Ceci correspond à des délais de traitement de 100 ns et 280 ns pour une fréquence de 50 MHz.

Tableau 3.8

Récapitulatif des résultats de mise en oeuvre du circuit

| | |
|------------------------|-------------|
| Fréquence maximale | 56.912 MHz |
| Latence maximale | 14 |
| # Niveaux logiques | 6 |
| # Slices | 730 (10%) |
| # Flip flop ou latches | 610 |
| # CLB avec LUT RAM/ROM | 24 |
| # IO externes | 89 (53%) |
| # Blocs RAM 32x1 | 16 (66.66%) |
| # GCLK | 1 (25%) |
| # portes | 294,577 |

3.7 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de vérifier que toute la logique utilisée pour la réalisation de ce circuit numérique et le choix de la technologie Virtex sont bons. Les résultats fournis par la mise en oeuvre sont très satisfaisants. Toutes les contraintes imposées ont été remplies à savoir la fréquence de fonctionnement de l'horloge et la latence du circuit. Ces bonnes performances, nous sommes encouragés à croire que les tests du circuit sur FPGA seront tous aussi satisfaisants.

CONCLUSION

Le but de ce projet était de concevoir et réaliser un circuit numérique capable de détecter des impulsions radar et d'estimer leurs largeurs et leurs temps d'arrivée. Ce circuit à implanter sur FPGA doit pouvoir fonctionner à une fréquence de 50 MHz avec une latence maximale de 200 ns et présenter une précision de mesure de l'ordre de 1 ns soit 0.05 %. Le travail réalisé dans ce projet a permis d'atteindre cet objectif.

La première partie du travail a consisté à faire une étude théorique des algorithmes de détection de signaux radar et d'estimation de leurs paramètres afin d'en sélectionner un qui permettrait de remplir toutes les fonctions du circuit avec un rapport précision versus complexité acceptable. En d'autres termes, l'erreur de mesures tolérée devait être inférieure à 5 % et le nombre de portes logiques nécessaires devait remplir les contraintes du FPGA utilisé.

Après analyse des caractéristiques des impulsions à traiter, le choix de la technique de détection s'est arrêté sur une détection à impulsion unique avec validation par décompte du nombre minimum $MH+1$ d'échantillons supérieurs au premier seuil $TH1$ sur le front montant de l'impulsion. Par la suite, nous avons fait une étude comparative de 7 méthodes d'interpolation judicieusement sélectionnées afin de choisir celle qui conviendrait le mieux au circuit. Les résultats de comparaison donnés au paragraphe 2.5 nous ont permis d'opter pour une méthode d'interpolation linéaire avec approximation du $PTAI$ par subdivision d'intervalle avec $N=16$. Cette méthode génère une erreur théorique de précision de l'ordre de 3.5 % avec une complexité matérielle

minimale. Suite à ces résultats théoriques satisfaisants, nous sommes passés à la conception du circuit sur Viewlogic.

Après entrée schématique du circuit et vérification du principe de fonctionnement par simulation sur Viewlogic, nous avons effectué la mise en œuvre du circuit par le logiciel M2.li. Les performances physiques obtenues présentent une fréquence maximale du circuit de 57 MHz. La latence maximale du détecteur est de 5 périodes d'horloge soit 100 ns pour une horloge de 50 MHz. Celle du circuit total (*détecteur + estimateur*) est de 14 périodes d'horloge. Ces résultats permettent de remplir toutes les contraintes imposées. La vérification du fonctionnement et de la performance du circuit étant concluante, nous sommes passés au test du circuit sur FPGA. Cette opération s'est avérée également satisfaisante même si nous n'avons pas pu mesurer l'influence du bruit. En effet, notre circuit étant destiné à un environnement avec bruit, un aspect de notre travail aurait pu être de le tester en fonction du bruit. Malheureusement, nous ne disposons pas de matériel de test qui permet de le faire. Le seul bruit testé est celui généré par les appareils de la salle de test. Les bons résultats obtenus montrent que cette puissance de bruit n'a aucune influence sur les performances du circuit, ce qui est très encourageant pour le fonctionnement dans son futur environnement. Notons que les choix judicieux de l'algorithme, de la structure des blocs logiques et de la technologie utilisée sont autant de paramètres qui ont conduit à la réussite de ce travail.

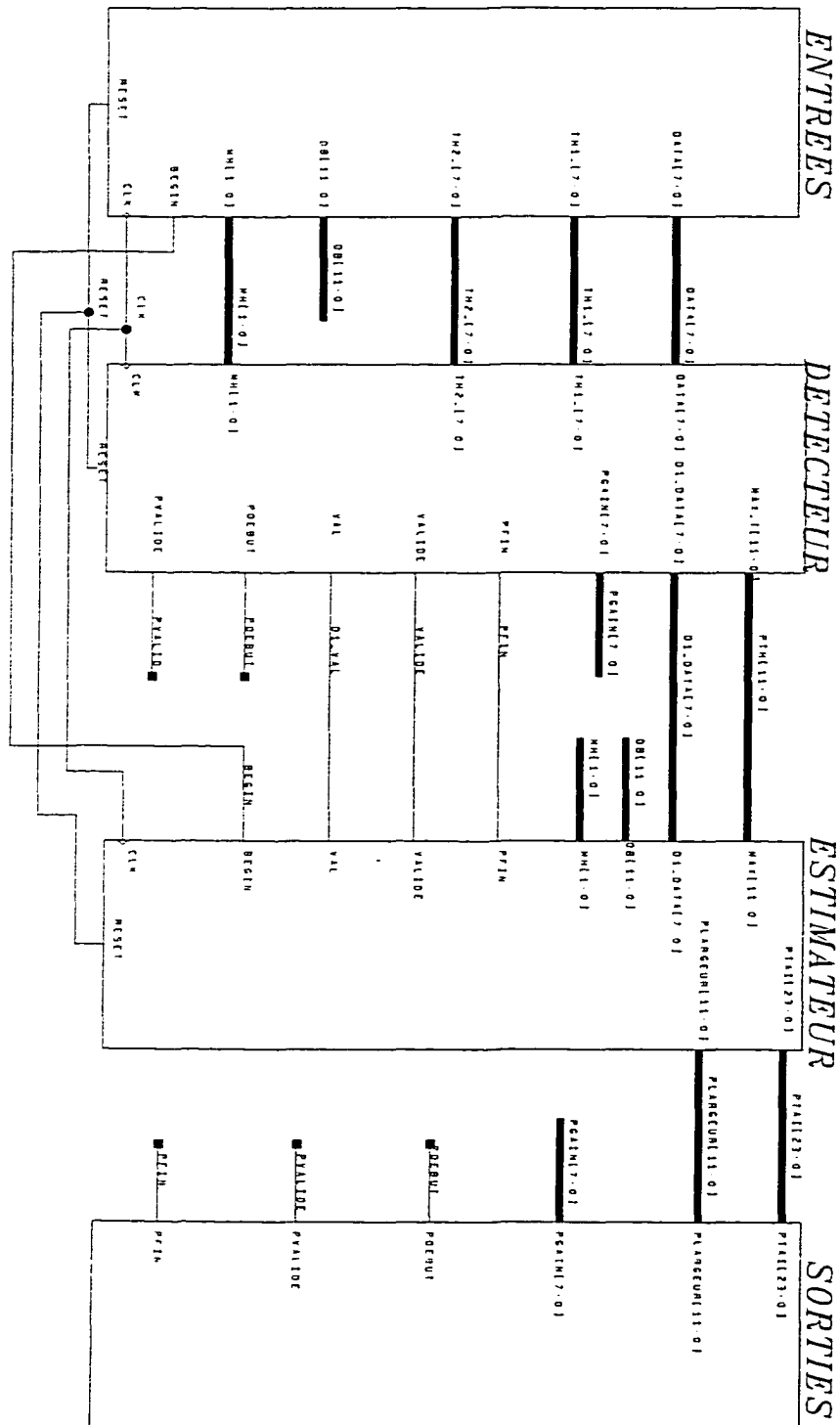
BIBLIOGRAPHIE

- 1 Harry L. Van Trees (1968). Detection, Estimation, and Modulation Theory. Part I. Massachusetts Institute of Technology. John Wiley & Sons, Inc.
- 2 K.Sam Shanmugan and A.M.Breipohl (1988). Random Signals. Detection, Estimation and Data Analysis. John Wiley & Sons, Inc.
- 3 G. Marchetti, G. Picchi and L. Verrazzani (1980). Detection and Time-of Arrival Estimation of Received Pulses in Radar Beacon Systems. IEEE Transactions on Aerospace and electronic systems vol.AES-16, No.3, may 1980.
- 4 Lamont V. Blake (1980). Radar Range-Performance Analysis. Lexington Books.
- 5 Merrill I. Skonik(1980). Introduction to Radar Systems. Mc Graw-Hill Book Compagny.
- 6 L. Thourel (1982). Initiation aux Techniques Modernes des RADARS. Cepadues éditions.
- 7 Henry Zmuda (1994). Photonic aspects of modern radar. Artech House Inc.
- 8 Fred E. Nathanson (1969). Radar Design Principles. Mc Graw-Hill Book Compagny.
- 9 Gilles Paquet(1997). Détection Électromagnétique. Fondements théoriques et applications radar. Masson S.A.

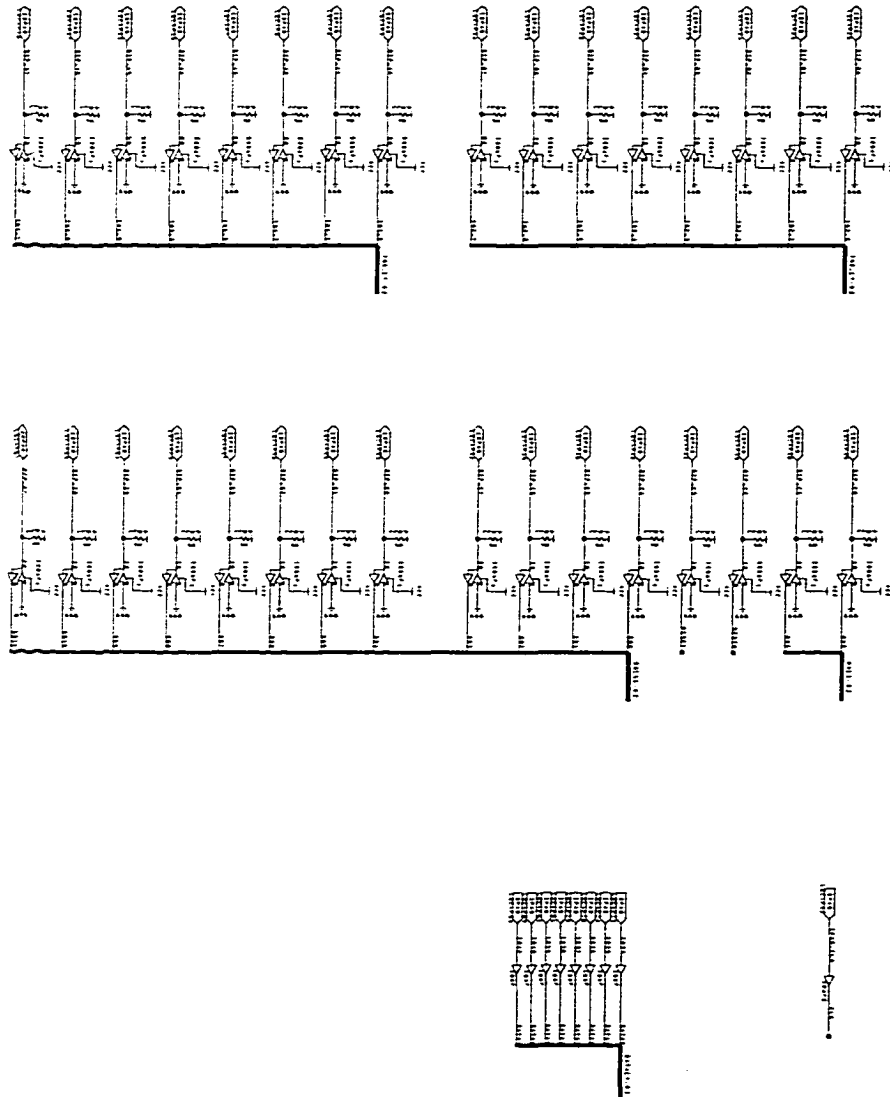
ANNEXE A

SCHÉMAS DES BLOCS ET SOUS-BLOCS DU CIRCUIT

BLOCS PRINCIPAUX DU CIRCUIT



PORTS D'ENTRÉE



SCHEMA BLOC DU DETECTEUR

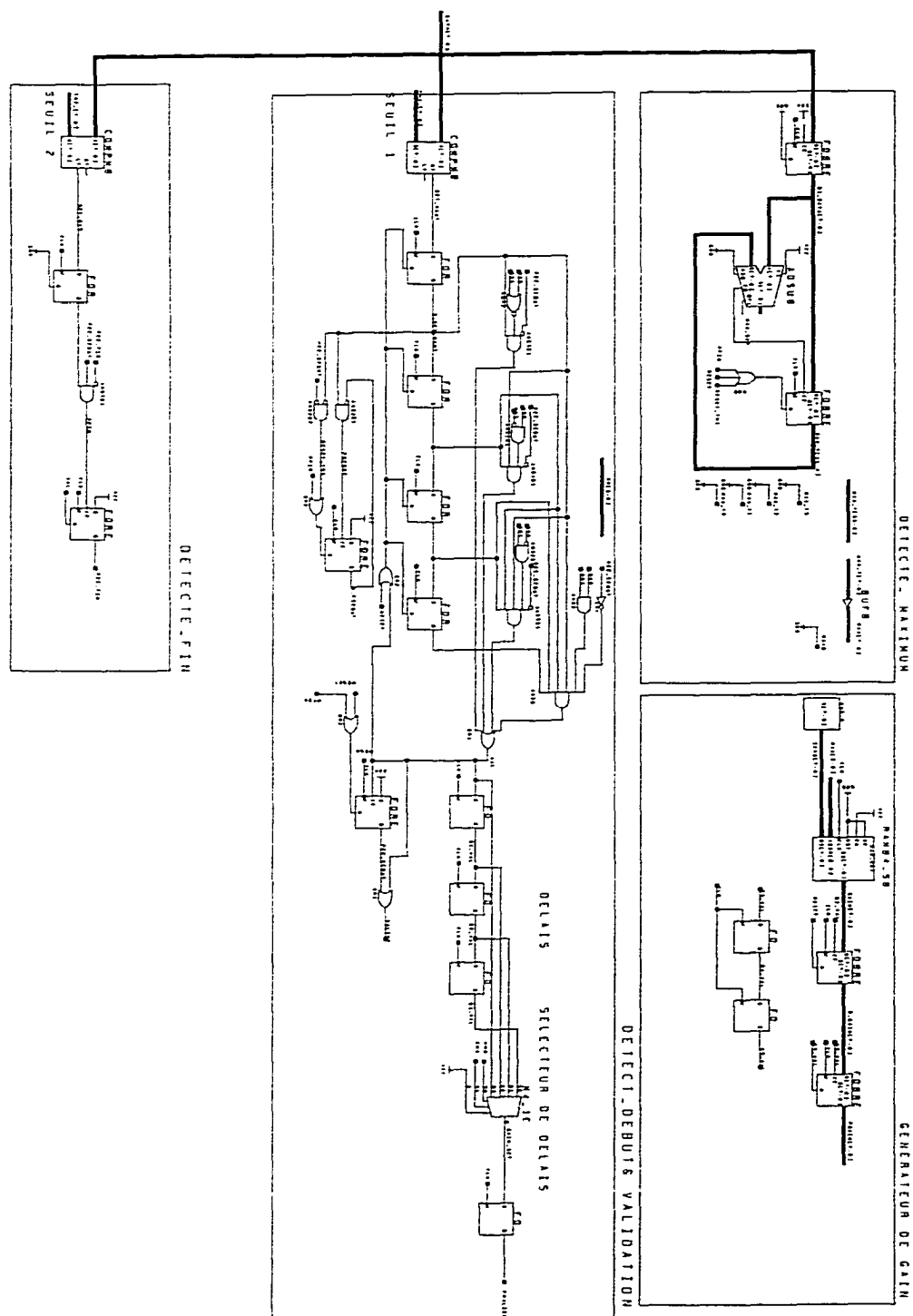


SCHÉMA BLOC DE L'ESTIMATEUR

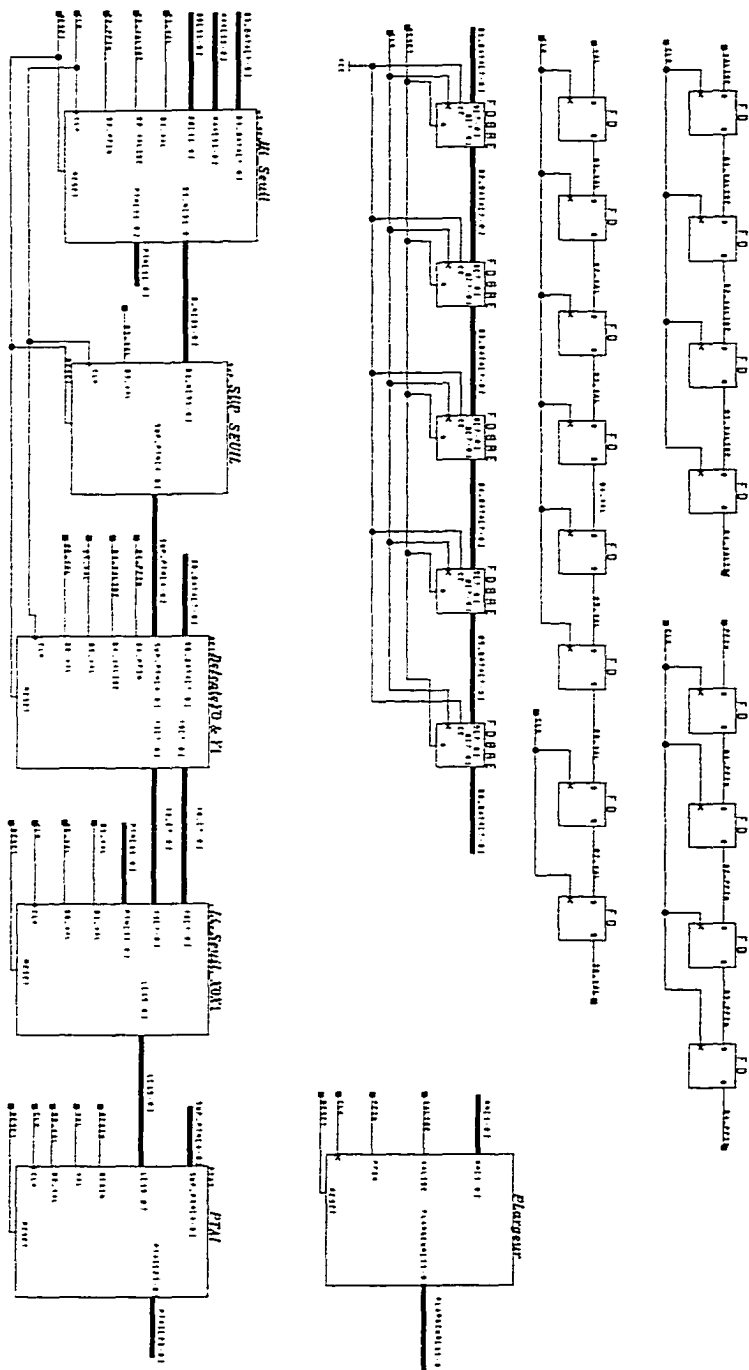
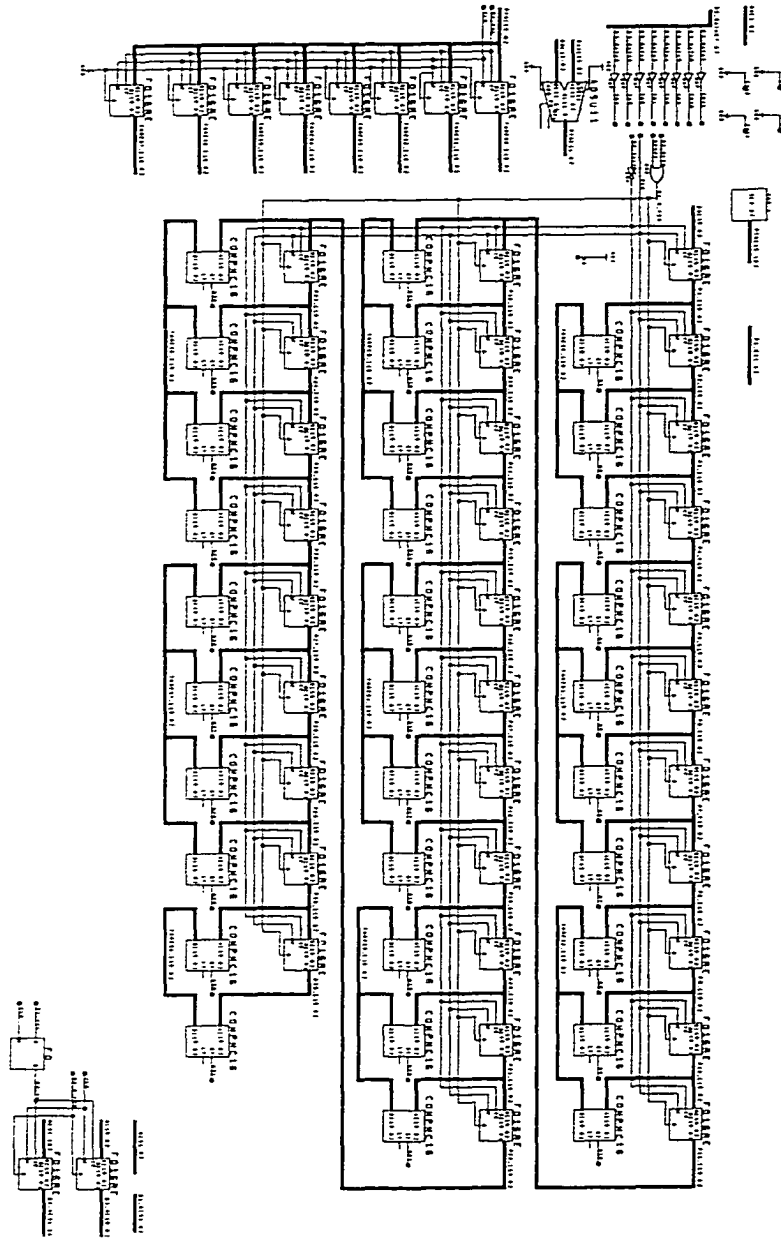
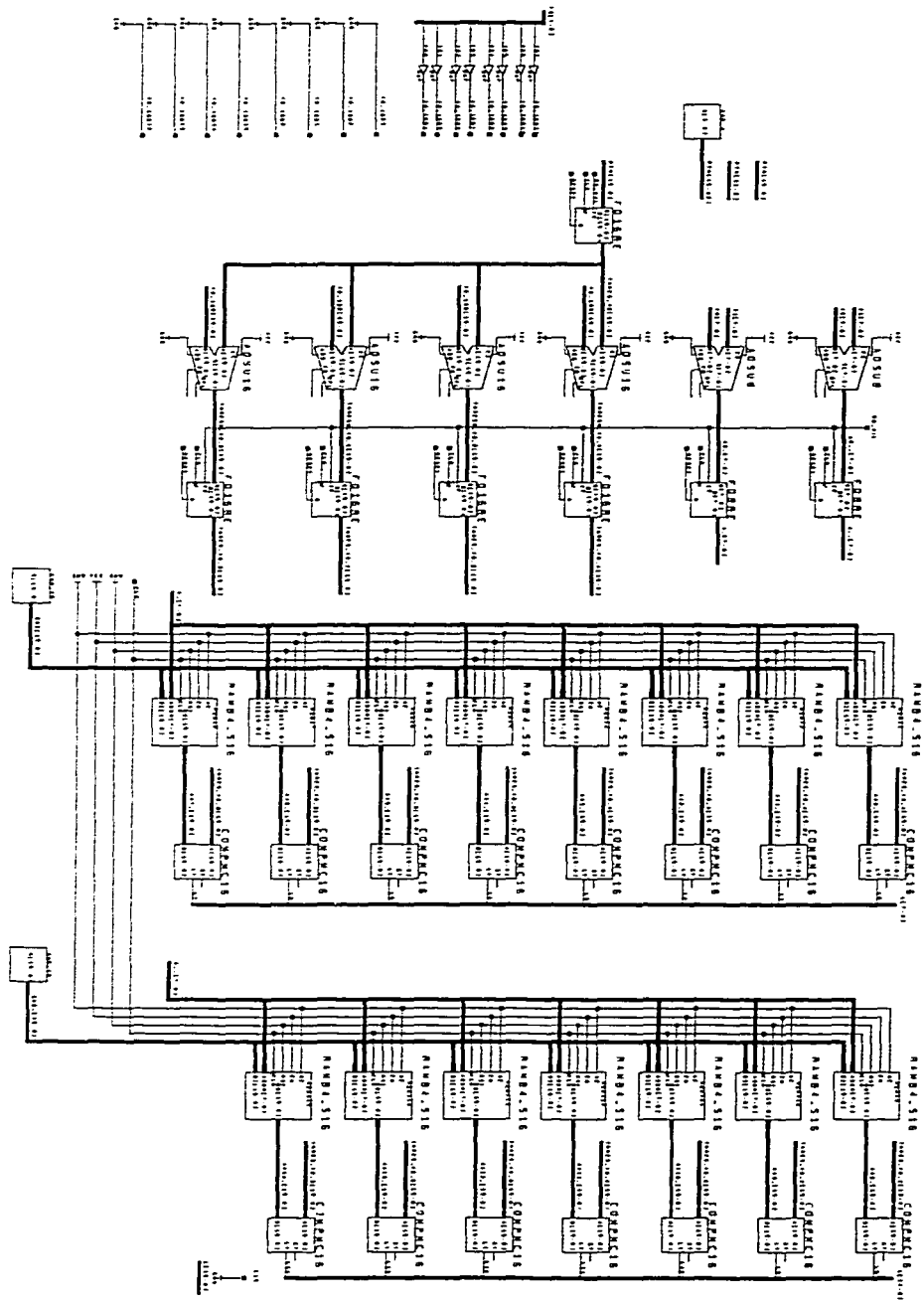


SCHÉMA BLOC DE HI_SEUIL



SCHEMA BLOC DE LI_SEUIL



SCHEMA BLOC DE PTAI

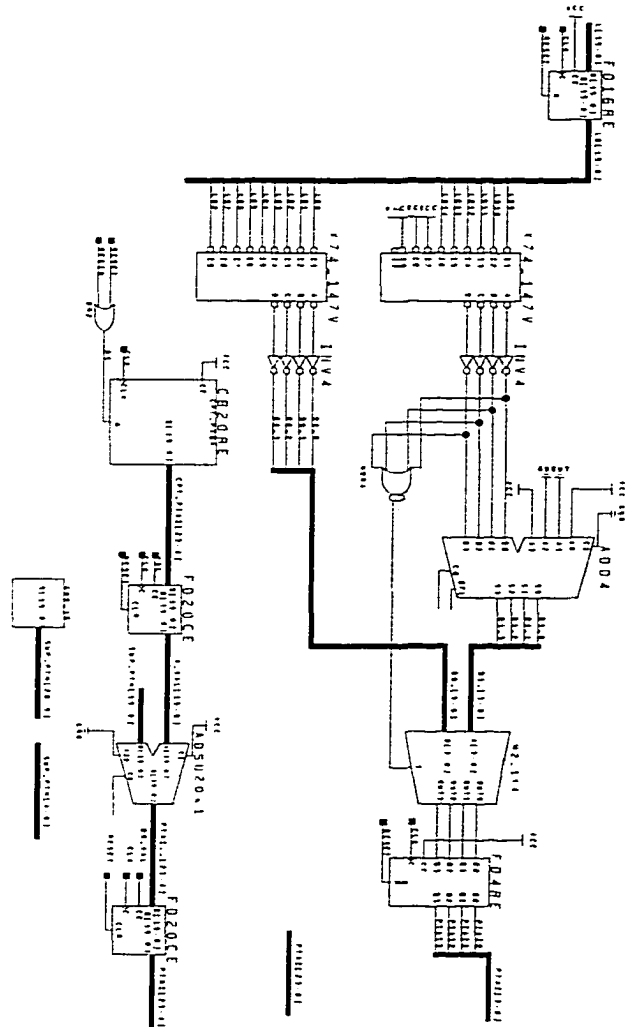
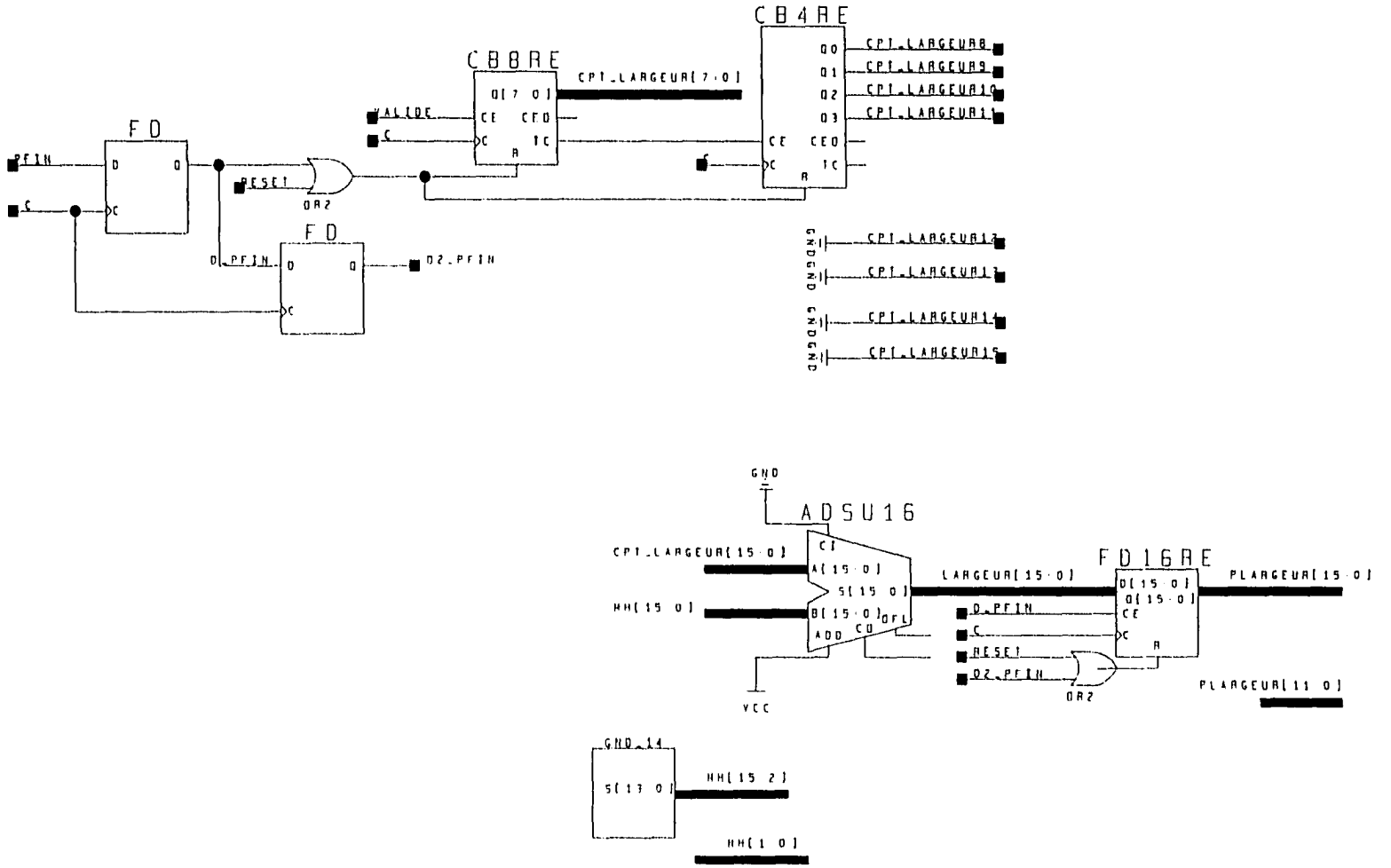


SCHÉMA BLOC DE PLARGEUR



ANNEXE B

DONNÉES DE LA TABLE DE CORRESPONDANCE DU GAIN DES IMPULSIONS

DONNÉES DE TABLE DE CORRESPONDANCE DU GAIN

256 valeurs possibles du gain

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----------------|----|
| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | A | B | C | D | E | F |
| 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 1A | 1B | 1C | 1D | 1 ^E | 1F |
| 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 2A | 2B | 2C | 2D | 2E | 2F |
| 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 3A | 3B | 3C | 3D | 3 ^E | 3F |
| 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 4A | 4B | 4C | 4D | 4 ^E | 4F |
| 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 | 57 | 58 | 59 | 5A | 5B | 5C | 5D | 5 ^E | 5F |
| 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 6A | 6B | 6C | 6D | 6 ^E | 6F |
| 70 | 71 | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 7A | 7B | 7C | 7D | 7 ^E | 7F |
| 80 | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 | 89 | 8A | 8B | 8C | 8D | 8 ^E | 8F |
| 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 9A | 9B | 9C | 9D | 9 ^E | 9F |
| A0 | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 | A7 | A8 | A9 | AA | AB | AC | AD | AE | AF |
| B0 | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 | B7 | B8 | B9 | BA | BB | BC | BD | BE | BF |
| C0 | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 | C9 | CA | CB | CC | CD | CE | CF |
| D0 | D1 | D2 | D3 | D4 | D5 | D6 | D7 | D8 | D9 | DA | DB | DC | DD | DE | DF |
| E0 | E1 | E2 | E3 | E4 | E5 | E6 | E7 | E8 | E9 | EA | EB | EC | ED | EE | EF |
| F0 | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 | F6 | F7 | F8 | F9 | FA | FB | FC | FD | FE | FF |

ANNEXE C

TABLE DE VÉRITÉ DU CODEUR DE "1"

TABLE DE VÉRITÉ DU CODEUR DE "1"
POUR CALCUL DU NOMBRE DE POINTS AU-DESSUS DU SEUIL

Cas avec 8 échantillons à comparer au seuil PTH.

H_i représente le résultat de comparaison de l'échantillon i par rapport au seuil PTH.

$S[3:0]$ est le nombre de points considérés être au-dessus du seuil.

| H7 | H6 | H5 | H4 | H3 | H2 | H1 | H0 | S3 | S2 | S1 | S0 |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | X | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | X | X | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | X | X | X | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | X | X | X | X | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 0 | 0 | 1 | X | X | X | X | X | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | X | X | X | X | X | X | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | X | X | X | X | X | X | X | 1 | 0 | 0 | 0 |

ANNEXE D

FICHER DES 15 RAM DU CALCUL DES PTAI

DONNÉES DES RAM DU CALCUL DE PTAI

ROM1

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| init_00 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0000 | 0001 | 0002 | 0003 | 0004 | 0005 | 0006 | 0007 | 0008 | 0009 | 000A | 000B | 000C | 000D | 000E | 000F |
| init_01 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0010 | 0011 | 0012 | 0013 | 0014 | 0015 | 0016 | 0017 | 0018 | 0019 | 001A | 001B | 001C | 001D | 001E | 001F |
| init_02 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0020 | 0021 | 0022 | 0023 | 0024 | 0025 | 0026 | 0027 | 0028 | 0029 | 002A | 002B | 002C | 002D | 002E | 002F |
| init_03 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0030 | 0031 | 0032 | 0033 | 0034 | 0035 | 0036 | 0037 | 0038 | 0039 | 003A | 003B | 003C | 003D | 003E | 003F |
| init_04 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0040 | 0041 | 0042 | 0043 | 0044 | 0045 | 0046 | 0047 | 0048 | 0049 | 004A | 004B | 004C | 004D | 004E | 004F |
| init_05 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0050 | 0051 | 0052 | 0053 | 0054 | 0055 | 0056 | 0057 | 0058 | 0059 | 005A | 005B | 005C | 005D | 005E | 005F |
| init_06 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0060 | 0061 | 0062 | 0063 | 0064 | 0065 | 0066 | 0067 | 0068 | 0069 | 006A | 006B | 006C | 006D | 006E | 006F |
| init_07 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0070 | 0071 | 0072 | 0073 | 0074 | 0075 | 0076 | 0077 | 0078 | 0079 | 007A | 007B | 007C | 007D | 007E | 007F |
| init_08 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0080 | 0081 | 0082 | 0083 | 0084 | 0085 | 0086 | 0087 | 0088 | 0089 | 008A | 008B | 008C | 008D | 008E | 008F |
| init_09 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0090 | 0091 | 0092 | 0093 | 0094 | 0095 | 0096 | 0097 | 0098 | 0099 | 009A | 009B | 009C | 009D | 009E | 009F |
| init_A | | | | | | | | | | | | | | | |
| 00A0 | 00A1 | 00A2 | 00A3 | 00A4 | 00A5 | 00A6 | 00A7 | 00A8 | 00A9 | 00AA | 00AB | 00AC | 00AD | 00AE | 00AF |
| init_B | | | | | | | | | | | | | | | |
| 00B0 | 00B1 | 00B2 | 00B3 | 00B4 | 00B5 | 00B6 | 00B7 | 00B8 | 00B9 | 00BA | 00BB | 00BC | 00BD | 00BE | 00BF |
| init_C | | | | | | | | | | | | | | | |
| 00C0 | 00C1 | 00C2 | 00C3 | 00C4 | 00C5 | 00C6 | 00C7 | 00C8 | 00C9 | 00CA | 00CB | 00CC | 00CD | 00CE | 00CF |
| init_D | | | | | | | | | | | | | | | |
| 00D0 | 00D1 | 00D2 | 00D3 | 00D4 | 00D5 | 00D6 | 00D7 | 00D8 | 00D9 | 00DA | 00DB | 00DC | 00DD | 00DE | 00DF |
| init_E | | | | | | | | | | | | | | | |
| 00E0 | 00E1 | 00E2 | 00E3 | 00E4 | 00E5 | 00E6 | 00E7 | 00E8 | 00E9 | 00EA | 00EB | 00EC | 00ED | 00EE | 00EF |
| init_F | | | | | | | | | | | | | | | |
| 00F0 | 00F1 | 00F2 | 00F3 | 00F4 | 00F5 | 00F6 | 00F7 | 00F8 | 00F9 | 00FA | 00FB | 00FC | 00FD | 00FE | 00FF |

ROM2

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| in_00 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0000 | 0002 | 0004 | 0006 | 0008 | 000A | 000C | 000E | 0010 | 0012 | 0014 | 0016 | 0018 | 001A | 001C | 001E |
| in_01 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0020 | 0022 | 0024 | 0026 | 0028 | 002A | 002C | 002E | 0030 | 0032 | 0034 | 0036 | 0038 | 003A | 003C | 003E |
| in_02 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0040 | 0042 | 0044 | 0046 | 0048 | 004A | 004C | 004E | 0050 | 0052 | 0054 | 0056 | 0058 | 005A | 005C | 005E |
| in_03 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0060 | 0062 | 0064 | 0066 | 0068 | 006A | 006C | 006E | 0070 | 0072 | 0074 | 0076 | 0078 | 007A | 007C | 007E |
| in_04 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0080 | 0082 | 0084 | 0086 | 0088 | 008A | 008C | 008E | 0090 | 0092 | 0094 | 0096 | 0098 | 009A | 009C | 009E |
| in_05 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 00A0 | 00A2 | 00A4 | 00A6 | 00A8 | 00AA | 00AC | 00AE | 00B0 | 00B2 | 00B4 | 00B6 | 00B8 | 00BA | 00BC | 00BE |
| in_06 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 00C0 | 00C2 | 00C4 | 00C6 | 00C8 | 00CA | 00CC | 00CE | 00D0 | 00D2 | 00D4 | 00D6 | 00D8 | 00DA | 00DC | 00DE |
| in_07 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 00E0 | 00E2 | 00E4 | 00E6 | 00E8 | 00EA | 00EC | 00EE | 00F0 | 00F2 | 00F4 | 00F6 | 00F8 | 00FA | 00FC | 00FE |
| in_08 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0100 | 0102 | 0104 | 0106 | 0108 | 010A | 010C | 010E | 0110 | 0112 | 0114 | 0116 | 0118 | 011A | 011C | 011E |
| in_09 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0120 | 0122 | 0124 | 0126 | 0128 | 012A | 012C | 012E | 0130 | 0132 | 0134 | 0136 | 0138 | 013A | 013C | 013E |
| in_A | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0140 | 0142 | 0144 | 0146 | 0148 | 014A | 014C | 014E | 0150 | 0152 | 0154 | 0156 | 0158 | 015A | 015C | 015E |
| in_B | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0160 | 0162 | 0164 | 0166 | 0168 | 016A | 016C | 016E | 0170 | 0172 | 0174 | 0176 | 0178 | 017A | 017C | 017E |
| in_C | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0180 | 0182 | 0184 | 0186 | 0188 | 018A | 018C | 018E | 0190 | 0192 | 0194 | 0196 | 0198 | 019A | 019C | 019E |
| in_D | | | | | | | | | | | | | | | |
| 01A0 | 01A2 | 01A4 | 01A6 | 01A8 | 01AA | 01AC | 01AE | 01B0 | 01B2 | 01B4 | 01B6 | 01B8 | 01BA | 01BC | 01BE |
| in_E | | | | | | | | | | | | | | | |
| 01C0 | 01C2 | 01C4 | 01C6 | 01C8 | 01CA | 01CC | 01CE | 01D0 | 01D2 | 01D4 | 01D6 | 01D8 | 01DA | 01DC | 01DE |
| in_F | | | | | | | | | | | | | | | |
| 01E0 | 01E2 | 01E4 | 01E6 | 01E8 | 01EA | 01EC | 01EE | 01F0 | 01F2 | 01F4 | 01F6 | 01F8 | 01FA | 01FC | 01FE |

ROM3

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| in_00 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0000 | 0003 | 0006 | 0009 | 000C | 000F | 0012 | 0015 | 0018 | 001B | 001E | 0021 | 0024 | 0027 | 002A | 002D |
| in_01 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0030 | 0033 | 0036 | 0039 | 003C | 003F | 0042 | 0045 | 0048 | 004B | 004E | 0051 | 0054 | 0057 | 005A | 005D |
| in_02 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0060 | 0063 | 0066 | 0069 | 006C | 006F | 0072 | 0075 | 0078 | 007B | 007E | 0081 | 0084 | 0087 | 008A | 008D |
| in_03 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0090 | 0093 | 0096 | 0099 | 009C | 009F | 00A2 | 00A5 | 00A8 | 00AB | 00AE | 00B1 | 00B4 | 00B7 | 00BA | 00BD |
| in_04 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 00C0 | 00C3 | 00C6 | 00C9 | 00CC | 00CF | 00D2 | 00D5 | 00D8 | 00DB | 00DE | 00E1 | 00E4 | 00E7 | 00EA | 00ED |
| in_05 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 00F0 | 00F3 | 00F6 | 00F9 | 00FC | 00FF | 0102 | 0105 | 0108 | 010B | 010E | 0111 | 0114 | 0117 | 011A | 011D |
| in_06 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0120 | 0123 | 0126 | 0129 | 012C | 012F | 0132 | 0135 | 0138 | 013B | 013E | 0141 | 0144 | 0147 | 014A | 014D |
| in_07 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0150 | 0153 | 0156 | 0159 | 015C | 015F | 0162 | 0165 | 0168 | 016B | 016E | 0171 | 0174 | 0177 | 017A | 017D |
| in_08 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0180 | 0183 | 0186 | 0189 | 018C | 018F | 0192 | 0195 | 0198 | 019B | 019E | 01A1 | 01A4 | 01A7 | 01AA | 01AD |
| in_09 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 01B0 | 01B3 | 01B6 | 01B9 | 01BC | 01BF | 01C2 | 01C5 | 01C8 | 01CB | 01CE | 01D1 | 01D4 | 01D7 | 01DA | 01DD |
| in_A | | | | | | | | | | | | | | | |
| 01E0 | 01E3 | 01E6 | 01E9 | 01EC | 01EF | 01F2 | 01F5 | 01F8 | 01FB | 01FE | 0201 | 0204 | 0207 | 020A | 020D |
| in_B | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0210 | 0213 | 0216 | 0219 | 021C | 021F | 0222 | 0225 | 0228 | 022B | 022E | 0231 | 0234 | 0237 | 023A | 023D |
| in_C | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0240 | 0243 | 0246 | 0249 | 024C | 024F | 0252 | 0255 | 0258 | 025B | 025E | 0261 | 0264 | 0267 | 026A | 026D |
| in_D | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0270 | 0273 | 0276 | 0279 | 027C | 027F | 0282 | 0285 | 0288 | 028B | 028E | 0291 | 0294 | 0297 | 029A | 029D |
| in_E | | | | | | | | | | | | | | | |
| 02A0 | 02A3 | 02A6 | 02A9 | 02AC | 02AF | 02B2 | 02B5 | 02B8 | 02BB | 02BE | 02C1 | 02C4 | 02C7 | 02CA | 02CD |
| in_F | | | | | | | | | | | | | | | |
| 02D0 | 02D3 | 02D6 | 02D9 | 02DC | 02DF | 02E2 | 02E5 | 02E8 | 02EB | 02EE | 02F1 | 02F4 | 02F7 | 02FA | 02FD |

ROM4

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| in_00 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0000 | 0004 | 0008 | 000C | 0010 | 0014 | 0018 | 001C | 0020 | 0024 | 0028 | 002C | 0030 | 0034 | 0038 | 003C |
| in_01 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0040 | 0044 | 0048 | 004C | 0050 | 0054 | 0058 | 005C | 0060 | 0064 | 0068 | 006C | 0070 | 0074 | 0078 | 007C |
| in_02 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0080 | 0084 | 0088 | 008C | 0090 | 0094 | 0098 | 009C | 00A0 | 00A4 | 00A8 | 00AC | 00B0 | 00B4 | 00B8 | 00BC |
| in_03 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 00C0 | 00C4 | 00C8 | 00CC | 00D0 | 00D4 | 00D8 | 00DC | 00E0 | 00E4 | 00E8 | 00EC | 00F0 | 00F4 | 00F8 | 00FC |
| in_04 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0100 | 0104 | 0108 | 010C | 0110 | 0114 | 0118 | 011C | 0120 | 0124 | 0128 | 012C | 0130 | 0134 | 0138 | 013C |
| in_05 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0140 | 0144 | 0148 | 014C | 0150 | 0154 | 0158 | 015C | 0160 | 0164 | 0168 | 016C | 0170 | 0174 | 0178 | 017C |
| in_06 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0180 | 0184 | 0188 | 018C | 0190 | 0194 | 0198 | 019C | 01A0 | 01A4 | 01A8 | 01AC | 01B0 | 01B4 | 01B8 | 01BC |
| in_07 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 01C0 | 01C4 | 01C8 | 01CC | 01D0 | 01D4 | 01D8 | 01DC | 01E0 | 01E4 | 01E8 | 01EC | 01F0 | 01F4 | 01F8 | 01FC |
| in_08 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0200 | 0204 | 0208 | 020C | 0210 | 0214 | 0218 | 021C | 0220 | 0224 | 0228 | 022C | 0230 | 0234 | 0238 | 023C |
| in_09 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0240 | 0244 | 0248 | 024C | 0250 | 0254 | 0258 | 025C | 0260 | 0264 | 0268 | 026C | 0270 | 0274 | 0278 | 027C |
| in_A | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0280 | 0284 | 0288 | 028C | 0290 | 0294 | 0298 | 029C | 02A0 | 02A4 | 02A8 | 02AC | 02B0 | 02B4 | 02B8 | 02BC |
| in_B | | | | | | | | | | | | | | | |
| 02C0 | 02C4 | 02C8 | 02CC | 02D0 | 02D4 | 02D8 | 02DC | 02E0 | 02E4 | 02E8 | 02EC | 02F0 | 02F4 | 02F8 | 02FC |
| in_C | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0300 | 0304 | 0308 | 030C | 0310 | 0314 | 0318 | 031C | 0320 | 0324 | 0328 | 032C | 0330 | 0334 | 0338 | 033C |
| in_D | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0340 | 0344 | 0348 | 034C | 0350 | 0354 | 0358 | 035C | 0360 | 0364 | 0368 | 036C | 0370 | 0374 | 0378 | 037C |
| in_E | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0380 | 0384 | 0388 | 038C | 0390 | 0394 | 0398 | 039C | 03A0 | 03A4 | 03A8 | 03AC | 03B0 | 03B4 | 03B8 | 03BC |
| in_F | | | | | | | | | | | | | | | |
| 03C0 | 03C4 | 03C8 | 03CC | 03D0 | 03D4 | 03D8 | 03DC | 03E0 | 03E4 | 03E8 | 03EC | 03F0 | 03F4 | 03F8 | 03FC |

ROM5

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| in_00 0000 | 0005 | 000A | 000F | 0014 | 0019 | 001E | 0023 | 0028 | 002D | 0032 | 0037 | 003C | 0041 | 0046 | 004B |
| in_01 0050 | 0055 | 005A | 005F | 0064 | 0069 | 006E | 0073 | 0078 | 007D | 0082 | 0087 | 008C | 0091 | 0096 | 009B |
| in_02 00A0 | 00A5 | 00AA | 00AF | 00B4 | 00B9 | 00BE | 00C3 | 00C8 | 00CD | 00D2 | 00D7 | 00DC | 00E1 | 00E6 | 00EB |
| in_03 00F0 | 00F5 | 00FA | 00FF | 0104 | 0109 | 010E | 0113 | 0118 | 011D | 0122 | 0127 | 012C | 0131 | 0136 | 013B |
| in_04 0140 | 0145 | 014A | 014F | 0154 | 0159 | 015E | 0163 | 0168 | 016D | 0172 | 0177 | 017C | 0181 | 0186 | 018B |
| in_05 0190 | 0195 | 019A | 019F | 01A4 | 01A9 | 01AE | 01B3 | 01B8 | 01BD | 01C2 | 01C7 | 01CC | 01D1 | 01D6 | 01DB |
| in_06 01E0 | 01E5 | 01EA | 01EF | 01F4 | 01F9 | 01FE | 0203 | 0208 | 020D | 0212 | 0217 | 021C | 0221 | 0226 | 022B |
| in_07 0230 | 0235 | 023A | 023F | 0244 | 0249 | 024E | 0253 | 0258 | 025D | 0262 | 0267 | 026C | 0271 | 0276 | 027B |
| in_08 0280 | 0285 | 028A | 028F | 0294 | 0299 | 029E | 02A3 | 02A8 | 02AD | 02B2 | 02B7 | 02BC | 02C1 | 02C6 | 02CB |
| in_09 02D0 | 02D5 | 02DA | 02DF | 02E4 | 02E9 | 02EE | 02F3 | 02F8 | 02FD | 0302 | 0307 | 030C | 0311 | 0316 | 031B |
| in_A 0320 | 0325 | 032A | 032F | 0334 | 0339 | 033E | 0343 | 0348 | 034D | 0352 | 0357 | 035C | 0361 | 0366 | 036B |
| in_B 0370 | 0375 | 037A | 037F | 0384 | 0389 | 038E | 0393 | 0398 | 039D | 03A2 | 03A7 | 03AC | 03B1 | 03B6 | 03BB |
| in_C 03C0 | 03C5 | 03CA | 03CF | 03D4 | 03D9 | 03DE | 03E3 | 03E8 | 03ED | 03F2 | 03F7 | 03FC | 0401 | 0406 | 040B |
| in_D 0410 | 0415 | 041A | 041F | 0424 | 0429 | 042E | 0433 | 0438 | 043D | 0442 | 0447 | 044C | 0451 | 0456 | 045B |
| in_E 0460 | 0465 | 046A | 046F | 0474 | 0479 | 047E | 0483 | 0488 | 048D | 0492 | 0497 | 049C | 04A1 | 04A6 | 04AB |
| in_F 04B0 | 04B5 | 04BA | 04BF | 04C4 | 04C9 | 04CE | 04D3 | 04D8 | 04DD | 04E2 | 04E7 | 04EC | 04F1 | 04F6 | 04FB |

ROM6

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| in_00 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0000 | 0006 | 000C | 0012 | 0018 | 001E | 0024 | 002A | 0030 | 0036 | 003C | 0042 | 0048 | 004E | 0054 | 005A |
| in_01 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0060 | 0066 | 006C | 0072 | 0078 | 007E | 0084 | 008A | 0090 | 0096 | 009C | 00A2 | 00A8 | 00AE | 00B4 | 00BA |
| in_02 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 00C0 | 00C6 | 00CC | 00D2 | 00D8 | 00DE | 00E4 | 00EA | 00F0 | 00F6 | 00FC | 0102 | 0108 | 010E | 0114 | 011A |
| in_03 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0120 | 0126 | 012C | 0132 | 0138 | 013E | 0144 | 014A | 0150 | 0156 | 015C | 0162 | 0168 | 016E | 0174 | 017A |
| in_04 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0180 | 0186 | 018C | 0192 | 0198 | 019E | 01A4 | 01AA | 01B0 | 01B6 | 01BC | 01C2 | 01C8 | 01CE | 01D4 | 01DA |
| in_05 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 01E0 | 01E6 | 01EC | 01F2 | 01F8 | 01FE | 0204 | 020A | 0210 | 0216 | 021C | 0222 | 0228 | 022E | 0234 | 023A |
| in_06 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0240 | 0246 | 024C | 0252 | 0258 | 025E | 0264 | 026A | 0270 | 0276 | 027C | 0282 | 0288 | 028E | 0294 | 029A |
| in_07 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 02A0 | 02A6 | 02AC | 02B2 | 02B8 | 02BE | 02C4 | 02CA | 02D0 | 02D6 | 02DC | 02E2 | 02E8 | 02EE | 02F4 | 02FA |
| in_08 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0300 | 0306 | 030C | 0312 | 0318 | 031E | 0324 | 032A | 0330 | 0336 | 033C | 0342 | 0348 | 034E | 0354 | 035A |
| in_09 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0360 | 0366 | 036C | 0372 | 0378 | 037E | 0384 | 038A | 0390 | 0396 | 039C | 03A2 | 03A8 | 03AE | 03B4 | 03BA |
| in_A | | | | | | | | | | | | | | | |
| 03C0 | 03C6 | 03CC | 03D2 | 03D8 | 03DE | 03E4 | 03EA | 03F0 | 03F6 | 03FC | 0402 | 0408 | 040E | 0414 | 041A |
| in_B | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0420 | 0426 | 042C | 0432 | 0438 | 043E | 0444 | 044A | 0450 | 0456 | 045C | 0462 | 0468 | 046E | 0474 | 047A |
| in_C | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0480 | 0486 | 048C | 0492 | 0498 | 049E | 04A4 | 04AA | 04B0 | 04B6 | 04BC | 04C2 | 04C8 | 04CE | 04D4 | 04DA |
| in_D | | | | | | | | | | | | | | | |
| 04E0 | 04E6 | 04EC | 04F2 | 04F8 | 04FE | 0504 | 050A | 0510 | 0516 | 051C | 0522 | 0528 | 052E | 0534 | 053A |
| in_E | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0540 | 0546 | 054C | 0552 | 0558 | 055E | 0564 | 056A | 0570 | 0576 | 057C | 0582 | 0588 | 058E | 0594 | 059A |
| in_F | | | | | | | | | | | | | | | |
| 05A0 | 05A6 | 05AC | 05B2 | 05B8 | 05BE | 05C4 | 05CA | 05D0 | 05D6 | 05DC | 05E2 | 05E8 | 05EE | 05F4 | 05FA |

ROM7

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| in_00 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0000 | 0007 | 000E | 0015 | 001C | 0023 | 002A | 0031 | 0038 | 003F | 0046 | 004D | 0054 | 005B | 0062 | 0069 |
| in_01 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0070 | 0077 | 007E | 0085 | 008C | 0093 | 009A | 00A1 | 00A8 | 00AF | 00B6 | 00BD | 00C4 | 00CB | 00D2 | 00D9 |
| in_02 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 00E0 | 00E7 | 00EE | 00F5 | 00FC | 0103 | 010A | 0111 | 0118 | 011F | 0126 | 012D | 0134 | 013B | 0142 | 0149 |
| in_03 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0150 | 0157 | 015E | 0165 | 016C | 0173 | 017A | 0181 | 0188 | 018F | 0196 | 019D | 01A4 | 01AB | 01B2 | 01B9 |
| in_04 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 01C0 | 01C7 | 01CE | 01D5 | 01DC | 01E3 | 01EA | 01F1 | 01F8 | 01FF | 0206 | 020D | 0214 | 021B | 0222 | 0229 |
| in_05 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0230 | 0237 | 023E | 0245 | 024C | 0253 | 025A | 0261 | 0268 | 026F | 0276 | 027D | 0284 | 028B | 0292 | 0299 |
| in_06 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 02A0 | 02A7 | 02AE | 02B5 | 02BC | 02C3 | 02CA | 02D1 | 02D8 | 02DF | 02E6 | 02ED | 02F4 | 02FB | 0302 | 0309 |
| in_07 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0310 | 0317 | 031E | 0325 | 032C | 0333 | 033A | 0341 | 0348 | 034F | 0356 | 035D | 0364 | 036B | 0372 | 0379 |
| in_08 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0380 | 0387 | 038E | 0395 | 039C | 03A3 | 03AA | 03B1 | 03B8 | 03BF | 03C6 | 03CD | 03D4 | 03DB | 03E2 | 03E9 |
| in_09 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 03F0 | 03F7 | 03FE | 0405 | 040C | 0413 | 041A | 0421 | 0428 | 042F | 0436 | 043D | 0444 | 044B | 0452 | 0459 |
| in_A | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0460 | 0467 | 046E | 0475 | 047C | 0483 | 048A | 0491 | 0498 | 049F | 04A6 | 04AD | 04B4 | 04BB | 04C2 | 04C9 |
| in_B | | | | | | | | | | | | | | | |
| 04D0 | 04D7 | 04DE | 04E5 | 04EC | 04F3 | 04FA | 0501 | 0508 | 050F | 0516 | 051D | 0524 | 052B | 0532 | 0539 |
| in_C | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0540 | 0547 | 054E | 0555 | 055C | 0563 | 056A | 0571 | 0578 | 057F | 0586 | 058D | 0594 | 059B | 05A2 | 05A9 |
| in_D | | | | | | | | | | | | | | | |
| 05B0 | 05B7 | 05BE | 05C5 | 05CC | 05D3 | 05DA | 05E1 | 05E8 | 05EF | 05F6 | 05FD | 0604 | 060B | 0612 | 0619 |
| in_E | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0620 | 0627 | 062E | 0635 | 063C | 0643 | 064A | 0651 | 0658 | 065F | 0666 | 066D | 0674 | 067B | 0682 | 0689 |
| in_F | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0690 | 0697 | 069E | 06A5 | 06AC | 06B3 | 06BA | 06C1 | 06C8 | 06CF | 06D6 | 06DD | 06E4 | 06EB | 06F2 | 06F9 |

ROM8

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| in_00 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0000 | 0008 | 0010 | 0018 | 0020 | 0028 | 0030 | 0038 | 0040 | 0048 | 0050 | 0058 | 0060 | 0068 | 0070 | 0078 |
| in_01 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0080 | 0088 | 0090 | 0098 | 00A0 | 00A8 | 00B0 | 00B8 | 00C0 | 00C8 | 00D0 | 00D8 | 00E0 | 00E8 | 00F0 | 00F8 |
| in_02 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0100 | 0108 | 0110 | 0118 | 0120 | 0128 | 0130 | 0138 | 0140 | 0148 | 0150 | 0158 | 0160 | 0168 | 0170 | 0178 |
| in_03 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0180 | 0188 | 0190 | 0198 | 01A0 | 01A8 | 01B0 | 01B8 | 01C0 | 01C8 | 01D0 | 01D8 | 01E0 | 01E8 | 01F0 | 01F8 |
| in_04 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0200 | 0208 | 0210 | 0218 | 0220 | 0228 | 0230 | 0238 | 0240 | 0248 | 0250 | 0258 | 0260 | 0268 | 0270 | 0278 |
| in_05 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0280 | 0288 | 0290 | 0298 | 02A0 | 02A8 | 02B0 | 02B8 | 02C0 | 02C8 | 02D0 | 02D8 | 02E0 | 02E8 | 02F0 | 02F8 |
| in_06 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0300 | 0308 | 0310 | 0318 | 0320 | 0328 | 0330 | 0338 | 0340 | 0348 | 0350 | 0358 | 0360 | 0368 | 0370 | 0378 |
| in_07 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0380 | 0388 | 0390 | 0398 | 03A0 | 03A8 | 03B0 | 03B8 | 03C0 | 03C8 | 03D0 | 03D8 | 03E0 | 03E8 | 03F0 | 03F8 |
| in_08 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0400 | 0408 | 0410 | 0418 | 0420 | 0428 | 0430 | 0438 | 0440 | 0448 | 0450 | 0458 | 0460 | 0468 | 0470 | 0478 |
| in_09 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0480 | 0488 | 0490 | 0498 | 04A0 | 04A8 | 04B0 | 04B8 | 04C0 | 04C8 | 04D0 | 04D8 | 04E0 | 04E8 | 04F0 | 04F8 |
| in_A | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0500 | 0508 | 0510 | 0518 | 0520 | 0528 | 0530 | 0538 | 0540 | 0548 | 0550 | 0558 | 0560 | 0568 | 0570 | 0578 |
| in_B | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0580 | 0588 | 0590 | 0598 | 05A0 | 05A8 | 05B0 | 05B8 | 05C0 | 05C8 | 05D0 | 05D8 | 05E0 | 05E8 | 05F0 | 05F8 |
| in_C | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0600 | 0608 | 0610 | 0618 | 0620 | 0628 | 0630 | 0638 | 0640 | 0648 | 0650 | 0658 | 0660 | 0668 | 0670 | 0678 |
| in_D | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0680 | 0688 | 0690 | 0698 | 06A0 | 06A8 | 06B0 | 06B8 | 06C0 | 06C8 | 06D0 | 06D8 | 06E0 | 06E8 | 06F0 | 06F8 |
| in_E | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0700 | 0708 | 0710 | 0718 | 0720 | 0728 | 0730 | 0738 | 0740 | 0748 | 0750 | 0758 | 0760 | 0768 | 0770 | 0778 |
| in_F | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0780 | 0788 | 0790 | 0798 | 07A0 | 07A8 | 07B0 | 07B8 | 07C0 | 07C8 | 07D0 | 07D8 | 07E0 | 07E8 | 07F0 | 07F8 |

ROM9

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| in_00 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0000 | 0009 | 0012 | 001B | 0024 | 002D | 0036 | 003F | 0048 | 0051 | 005A | 0063 | 006C | 0075 | 007E | 0087 |
| in_01 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0090 | 0099 | 00A2 | 00AB | 00B4 | 00BD | 00C6 | 00CF | 00D8 | 00E1 | 00EA | 00F3 | 00FC | 0105 | 010E | 0117 |
| in_02 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0120 | 0129 | 0132 | 013B | 0144 | 014D | 0156 | 015F | 0168 | 0171 | 017A | 0183 | 018C | 0195 | 019E | 01A7 |
| in_03 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 01B0 | 01B9 | 01C2 | 01CB | 01D4 | 01DD | 01E6 | 01EF | 01F8 | 0201 | 020A | 0213 | 021C | 0225 | 022E | 0237 |
| in_04 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0240 | 0249 | 0252 | 025B | 0264 | 026D | 0276 | 027F | 0288 | 0291 | 029A | 02A3 | 02AC | 02B5 | 02BE | 02C7 |
| in_05 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 02D0 | 02D9 | 02E2 | 02EB | 02F4 | 02FD | 0306 | 030F | 0318 | 0321 | 032A | 0333 | 033C | 0345 | 034E | 0357 |
| in_06 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0360 | 0369 | 0372 | 037B | 0384 | 038D | 0396 | 039F | 03A8 | 03B1 | 03BA | 03C3 | 03CC | 03D5 | 03DE | 03E7 |
| in_07 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 03F0 | 03F9 | 0402 | 040B | 0414 | 041D | 0426 | 042F | 0438 | 0441 | 044A | 0453 | 045C | 0465 | 046E | 0477 |
| in_08 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0480 | 0489 | 0492 | 049B | 04A4 | 04AD | 04B6 | 04BF | 04C8 | 04D1 | 04DA | 04E3 | 04EC | 04F5 | 04FE | 0507 |
| in_09 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0510 | 0519 | 0522 | 052B | 0534 | 053D | 0546 | 054F | 0558 | 0561 | 056A | 0573 | 057C | 0585 | 058E | 0597 |
| in_A | | | | | | | | | | | | | | | |
| 05A0 | 05A9 | 05B2 | 05BB | 05C4 | 05CD | 05D6 | 05DF | 05E8 | 05F1 | 05FA | 0603 | 060C | 0615 | 061E | 0627 |
| in_B | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0630 | 0639 | 0642 | 064B | 0654 | 065D | 0666 | 066F | 0678 | 0681 | 068A | 0693 | 069C | 06A5 | 06AE | 06B7 |
| in_C | | | | | | | | | | | | | | | |
| 06C0 | 06C9 | 06D2 | 06DB | 06E4 | 06ED | 06F6 | 06FF | 0708 | 0711 | 071A | 0723 | 072C | 0735 | 073E | 0747 |
| in_D | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0750 | 0759 | 0762 | 076B | 0774 | 077D | 0786 | 078F | 0798 | 07A1 | 07AA | 07B3 | 07BC | 07C5 | 07CE | 07D7 |
| in_E | | | | | | | | | | | | | | | |
| 07E0 | 07E9 | 07F2 | 07FB | 0804 | 080D | 0816 | 081F | 0828 | 0831 | 083A | 0843 | 084C | 0855 | 085E | 0867 |
| in_F | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0870 | 0879 | 0882 | 088B | 0894 | 089D | 08A6 | 08AF | 08B8 | 08C1 | 08CA | 08D3 | 08DC | 08E5 | 08EE | 08F7 |

ROM10

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| in_00 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0000 | 000A | 0014 | 001E | 0028 | 0032 | 003C | 0046 | 0050 | 005A | 0064 | 006E | 0078 | 0082 | 008C | 0096 |
| in_01 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 00A0 | 00AA | 00B4 | 00BE | 00C8 | 00D2 | 00DC | 00E6 | 00F0 | 00FA | 0104 | 010E | 0118 | 0122 | 012C | 0136 |
| in_02 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0140 | 014A | 0154 | 015E | 0168 | 0172 | 017C | 0186 | 0190 | 019A | 01A4 | 01AE | 01B8 | 01C2 | 01CC | 01D6 |
| in_03 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 01E0 | 01EA | 01F4 | 01FE | 0208 | 0212 | 021C | 0226 | 0230 | 023A | 0244 | 024E | 0258 | 0262 | 026C | 0276 |
| in_04 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0280 | 028A | 0294 | 029E | 02A8 | 02B2 | 02BC | 02C6 | 02D0 | 02DA | 02E4 | 02EE | 02F8 | 0302 | 030C | 0316 |
| in_05 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0320 | 032A | 0334 | 033E | 0348 | 0352 | 035C | 0366 | 0370 | 037A | 0384 | 038E | 0398 | 03A2 | 03AC | 03B6 |
| in_06 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 03C0 | 03CA | 03D4 | 03DE | 03E8 | 03F2 | 03FC | 0406 | 0410 | 041A | 0424 | 042E | 0438 | 0442 | 044C | 0456 |
| in_07 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0460 | 046A | 0474 | 047E | 0488 | 0492 | 049C | 04A6 | 04B0 | 04BA | 04C4 | 04CE | 04D8 | 04E2 | 04EC | 04F6 |
| in_08 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0500 | 050A | 0514 | 051E | 0528 | 0532 | 053C | 0546 | 0550 | 055A | 0564 | 056E | 0578 | 0582 | 058C | 0596 |
| in_09 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 05A0 | 05AA | 05B4 | 05BE | 05C8 | 05D2 | 05DC | 05E6 | 05F0 | 05FA | 0604 | 060E | 0618 | 0622 | 062C | 0636 |
| in_A | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0640 | 064A | 0654 | 065E | 0668 | 0672 | 067C | 0686 | 0690 | 069A | 06A4 | 06AE | 06B8 | 06C2 | 06CC | 06D6 |
| in_B | | | | | | | | | | | | | | | |
| 06E0 | 06EA | 06F4 | 06FE | 0708 | 0712 | 071C | 0726 | 0730 | 073A | 0744 | 074E | 0758 | 0762 | 076C | 0776 |
| in_C | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0780 | 078A | 0794 | 079E | 07A8 | 07B2 | 07BC | 07C6 | 07D0 | 07DA | 07E4 | 07EE | 07F8 | 0802 | 080C | 0816 |
| in_D | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0820 | 082A | 0834 | 083E | 0848 | 0852 | 085C | 0866 | 0870 | 087A | 0884 | 088E | 0898 | 08A2 | 08AC | 08B6 |
| in_E | | | | | | | | | | | | | | | |
| 08C0 | 08CA | 08D4 | 08DE | 08E8 | 08F2 | 08FC | 0906 | 0910 | 091A | 0924 | 092E | 0938 | 0942 | 094C | 0956 |
| in_F | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0960 | 096A | 0974 | 097E | 0988 | 0992 | 099C | 09A6 | 09B0 | 09BA | 09C4 | 09CE | 09D8 | 09E2 | 09EC | 09F6 |

ROM11

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| in_00 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0000 | 000B | 0016 | 0021 | 002C | 0037 | 0042 | 004D | 0058 | 0063 | 006E | 0079 | 0084 | 008F | 009A | 00A5 |
| in_01 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 00B0 | 00BB | 00C6 | 00D1 | 00DC | 00E7 | 00F2 | 00FD | 0108 | 0113 | 011E | 0129 | 0134 | 013F | 014A | 0155 |
| in_02 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0160 | 016B | 0176 | 0181 | 018C | 0197 | 01A2 | 01AD | 01B8 | 01C3 | 01CE | 01D9 | 01E4 | 01EF | 01FA | 0205 |
| in_03 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0210 | 021B | 0226 | 0231 | 023C | 0247 | 0252 | 025D | 0268 | 0273 | 027E | 0289 | 0294 | 029F | 02AA | 02B5 |
| in_04 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 02C0 | 02CB | 02D6 | 02E1 | 02EC | 02F7 | 0302 | 030D | 0318 | 0323 | 032E | 0339 | 0344 | 034F | 035A | 0365 |
| in_05 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0370 | 037B | 0386 | 0391 | 039C | 03A7 | 03B2 | 03BD | 03C8 | 03D3 | 03DE | 03E9 | 03F4 | 03FF | 040A | 0415 |
| in_06 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0420 | 042B | 0436 | 0441 | 044C | 0457 | 0462 | 046D | 0478 | 0483 | 048E | 0499 | 04A4 | 04AF | 04BA | 04C5 |
| in_07 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 04D0 | 04DB | 04E6 | 04F1 | 04FC | 0507 | 0512 | 051D | 0528 | 0533 | 053E | 0549 | 0554 | 055F | 056A | 0575 |
| in_08 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0580 | 058B | 0596 | 05A1 | 05AC | 05B7 | 05C2 | 05CD | 05D8 | 05E3 | 05EE | 05F9 | 0604 | 060F | 061A | 0625 |
| in_09 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0630 | 063B | 0646 | 0651 | 065C | 0667 | 0672 | 067D | 0688 | 0693 | 069E | 06A9 | 06B4 | 06BF | 06CA | 06D5 |
| in_A | | | | | | | | | | | | | | | |
| 06E0 | 06EB | 06F6 | 0701 | 070C | 0717 | 0722 | 072D | 0738 | 0743 | 074E | 0759 | 0764 | 076F | 077A | 0785 |
| in_B | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0790 | 079B | 07A6 | 07B1 | 07BC | 07C7 | 07D2 | 07DD | 07E8 | 07F3 | 07FE | 0809 | 0814 | 081F | 082A | 0835 |
| in_C | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0840 | 084B | 0856 | 0861 | 086C | 0877 | 0882 | 088D | 0898 | 08A3 | 08AE | 08B9 | 08C4 | 08CF | 08DA | 08E5 |
| in_D | | | | | | | | | | | | | | | |
| 08F0 | 08FB | 0906 | 0911 | 091C | 0927 | 0932 | 093D | 0948 | 0953 | 095E | 0969 | 0974 | 097F | 098A | 0995 |
| in_E | | | | | | | | | | | | | | | |
| 09A0 | 09AB | 09B6 | 09C1 | 09CC | 09D7 | 09E2 | 09ED | 09F8 | 0A03 | 0A0E | 0A19 | 0A24 | 0A2F | 0A3A | 0A45 |
| in_F | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0A50 | 0A5B | 0A66 | 0A71 | 0A7C | 0A87 | 0A92 | 0A9D | 0AA8 | 0AB3 | 0ABE | 0AC9 | 0AD4 | 0ADF | 0AEa | 0AF5 |

ROM12

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| in_00 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0000 | 000C | 0018 | 0024 | 0030 | 003C | 0048 | 0054 | 0060 | 006C | 0078 | 0084 | 0090 | 009C | 00A8 | 00B4 |
| in_01 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 00C0 | 00CC | 00D8 | 00E4 | 00F0 | 00FC | 0108 | 0114 | 0120 | 012C | 0138 | 0144 | 0150 | 015C | 0168 | 0174 |
| in_02 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0180 | 018C | 0198 | 01A4 | 01B0 | 01BC | 01C8 | 01D4 | 01E0 | 01EC | 01F8 | 0204 | 0210 | 021C | 0228 | 0234 |
| in_03 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0240 | 024C | 0258 | 0264 | 0270 | 027C | 0288 | 0294 | 02A0 | 02AC | 02B8 | 02C4 | 02D0 | 02DC | 02E8 | 02F4 |
| in_04 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0300 | 030C | 0318 | 0324 | 0330 | 033C | 0348 | 0354 | 0360 | 036C | 0378 | 0384 | 0390 | 039C | 03A8 | 03B4 |
| in_05 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 03C0 | 03CC | 03D8 | 03E4 | 03F0 | 03FC | 0408 | 0414 | 0420 | 042C | 0438 | 0444 | 0450 | 045C | 0468 | 0474 |
| in_06 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0480 | 048C | 0498 | 04A4 | 04B0 | 04BC | 04C8 | 04D4 | 04E0 | 04EC | 04F8 | 0504 | 0510 | 051C | 0528 | 0534 |
| in_07 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0540 | 054C | 0558 | 0564 | 0570 | 057C | 0588 | 0594 | 05A0 | 05AC | 05B8 | 05C4 | 05D0 | 05DC | 05E8 | 05F4 |
| in_08 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0600 | 060C | 0618 | 0624 | 0630 | 063C | 0648 | 0654 | 0660 | 066C | 0678 | 0684 | 0690 | 069C | 06A8 | 06B4 |
| in_09 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 06C0 | 06CC | 06D8 | 06E4 | 06F0 | 06FC | 0708 | 0714 | 0720 | 072C | 0738 | 0744 | 0750 | 075C | 0768 | 0774 |
| in_A | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0780 | 078C | 0798 | 07A4 | 07B0 | 07BC | 07C8 | 07D4 | 07E0 | 07EC | 07F8 | 0804 | 0810 | 081C | 0828 | 0834 |
| in_B | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0840 | 084C | 0858 | 0864 | 0870 | 087C | 0888 | 0894 | 08A0 | 08AC | 08B8 | 08C4 | 08D0 | 08DC | 08E8 | 08F4 |
| in_C | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0900 | 090C | 0918 | 0924 | 0930 | 093C | 0948 | 0954 | 0960 | 096C | 0978 | 0984 | 0990 | 099C | 09A8 | 09B4 |
| in_D | | | | | | | | | | | | | | | |
| 09C0 | 09CC | 09D8 | 09E4 | 09F0 | 09FC | 0A08 | 0A14 | 0A20 | 0A2C | 0A38 | 0A44 | 0A50 | 0A5C | 0A68 | 0A74 |
| in_E | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0A80 | 0A8C | 0A98 | 0AA4 | 0AB0 | 0ABc | 0AC8 | 0AD4 | 0AE0 | 0AEC | 0AF8 | 0B04 | 0B10 | 0B1C | 0B28 | 0B34 |
| in_F | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0B40 | 0B4C | 0B58 | 0B64 | 0B70 | 0B7C | 0B88 | 0B94 | 0BA0 | 0BAc | 0BB8 | 0BC4 | 0BD0 | 0BDc | 0BE8 | 0BF4 |

ROM13

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| in_00 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0000 | 000D | 001A | 0027 | 0034 | 0041 | 004E | 005B | 0068 | 0075 | 0082 | 008F | 009C | 00A9 | 00B6 | 00C3 |
| in_01 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 00D0 | 00DD | 00EA | 00F7 | 0104 | 0111 | 011E | 012B | 0138 | 0145 | 0152 | 015F | 016C | 0179 | 0186 | 0193 |
| in_02 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 01A0 | 01AD | 01BA | 01C7 | 01D4 | 01E1 | 01EE | 01FB | 0208 | 0215 | 0222 | 022F | 023C | 0249 | 0256 | 0263 |
| in_03 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0270 | 027D | 028A | 0297 | 02A4 | 02B1 | 02BE | 02CB | 02D8 | 02E5 | 02F2 | 02FF | 030C | 0319 | 0326 | 0333 |
| in_04 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0340 | 034D | 035A | 0367 | 0374 | 0381 | 038E | 039B | 03A8 | 03B5 | 03C2 | 03CF | 03DC | 03E9 | 03F6 | 0403 |
| in_05 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0410 | 041D | 042A | 0437 | 0444 | 0451 | 045E | 046B | 0478 | 0485 | 0492 | 049F | 04AC | 04B9 | 04C6 | 04D3 |
| in_06 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 04E0 | 04ED | 04FA | 0507 | 0514 | 0521 | 052E | 053B | 0548 | 0555 | 0562 | 056F | 057C | 0589 | 0596 | 05A3 |
| in_07 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 05B0 | 05BD | 05CA | 05D7 | 05E4 | 05F1 | 05FE | 060B | 0618 | 0625 | 0632 | 063F | 064C | 0659 | 0666 | 0673 |
| in_08 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0680 | 068D | 069A | 06A7 | 06B4 | 06C1 | 06CE | 06DB | 06E8 | 06F5 | 0702 | 070F | 071C | 0729 | 0736 | 0743 |
| in_09 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0750 | 075D | 076A | 0777 | 0784 | 0791 | 079E | 07AB | 07B8 | 07C5 | 07D2 | 07DF | 07EC | 07F9 | 0806 | 0813 |
| in_A | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0820 | 082D | 083A | 0847 | 0854 | 0861 | 086E | 087B | 0888 | 0895 | 08A2 | 08AF | 08BC | 08C9 | 08D6 | 08E3 |
| in_B | | | | | | | | | | | | | | | |
| 08F0 | 08FD | 090A | 0917 | 0924 | 0931 | 093E | 094B | 0958 | 0965 | 0972 | 097F | 098C | 0999 | 09A6 | 09B3 |
| in_C | | | | | | | | | | | | | | | |
| 09C0 | 09CD | 09DA | 09E7 | 09F4 | 0A01 | 0A0E | 0A1B | 0A28 | 0A35 | 0A42 | 0A4F | 0A5C | 0A69 | 0A76 | 0A83 |
| in_D | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0A90 | 0A9D | 0AAa | 0AB7 | 0AC4 | 0AD1 | 0ADc | 0AEB | 0AF8 | 0B05 | 0B12 | 0B1F | 0B2C | 0B39 | 0B46 | 0B53 |
| in_E | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0B60 | 0B6D | 0B7A | 0B87 | 0B94 | 0BA1 | 0BAE | 0BBB | 0BC8 | 0BD5 | 0BE2 | 0BEF | 0BFC | 0C09 | 0C16 | 0C23 |
| in_F | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0C30 | 0C3D | 0C4A | 0C57 | 0C64 | 0C71 | 0C7E | 0C8B | 0C98 | 0CA5 | 0CB2 | 0CBF | 0CCC | 0CD9 | 0CE6 | 0CF3 |

ROM14**in_00**

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0000 | 000E | 001C | 002A | 0038 | 0046 | 0054 | 0062 | 0070 | 007E | 008C | 009A | 00A8 | 00B6 | 00C4 | 00D2 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|

in_01

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 00E0 | 00EE | 00FC | 010A | 0118 | 0126 | 0134 | 0142 | 0150 | 015E | 016C | 017A | 0188 | 0196 | 01A4 | 01B2 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|

in_02

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 01C0 | 01CE | 01DC | 01EA | 01F8 | 0206 | 0214 | 0222 | 0230 | 023E | 024C | 025A | 0268 | 0276 | 0284 | 0292 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|

in_03

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 02A0 | 02AE | 02BC | 02CA | 02D8 | 02E6 | 02F4 | 0302 | 0310 | 031E | 032C | 033A | 0348 | 0356 | 0364 | 0372 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|

in_04

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0380 | 038E | 039C | 03AA | 03B8 | 03C6 | 03D4 | 03E2 | 03F0 | 03FE | 040C | 041A | 0428 | 0436 | 0444 | 0452 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|

in_05

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0460 | 046E | 047C | 048A | 0498 | 04A6 | 04B4 | 04C2 | 04D0 | 04DE | 04EC | 04FA | 0508 | 0516 | 0524 | 0532 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|

in_06

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0540 | 054E | 055C | 056A | 0578 | 0586 | 0594 | 05A2 | 05B0 | 05BE | 05CC | 05DA | 05E8 | 05F6 | 0604 | 0612 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|

in_07

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0620 | 062E | 063C | 064A | 0658 | 0666 | 0674 | 0682 | 0690 | 069E | 06AC | 06BA | 06C8 | 06D6 | 06E4 | 06F2 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|

in_08

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0700 | 070E | 071C | 072A | 0738 | 0746 | 0754 | 0762 | 0770 | 077E | 078C | 079A | 07A8 | 07B6 | 07C4 | 07D2 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|

in_09

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 07E0 | 07EE | 07FC | 080A | 0818 | 0826 | 0834 | 0842 | 0850 | 085E | 086C | 087A | 0888 | 0896 | 08A4 | 08B2 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|

in_A

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 08C0 | 08CE | 08DC | 08EA | 08F8 | 0906 | 0914 | 0922 | 0930 | 093E | 094C | 095A | 0968 | 0976 | 0984 | 0992 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|

in_B

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 09A0 | 09AE | 09BC | 09CA | 09D8 | 09E6 | 09F4 | 0A02 | 0A10 | 0A1E | 0A2C | 0A3A | 0A48 | 0A56 | 0A64 | 0A72 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|

in_C

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0A80 | 0A8E | 0A9C | 0AAa | 0AB8 | 0AC6 | 0AD4 | 0AE2 | 0AF0 | 0AFE | 0B0C | 0B1A | 0B28 | 0B36 | 0B44 | 0B52 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|

in_D

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0B60 | 0B6E | 0B7C | 0B8A | 0B98 | 0BA6 | 0BB4 | 0BC2 | 0BD0 | 0BDE | 0BEC | 0BFA | 0C08 | 0C16 | 0C24 | 0C32 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|

in_E

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0C40 | 0C4E | 0C5C | 0C6A | 0C78 | 0C86 | 0C94 | 0CA2 | 0CB0 | 0CBE | 0CCC | 0CDa | 0CE8 | 0CF6 | 0D04 | 0D12 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|

in_F

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0D20 | 0D2E | 0D3C | 0D4A | 0D58 | 0D66 | 0D74 | 0D82 | 0D90 | 0D9E | 0DAc | 0DBa | 0DC8 | 0DD6 | 0DE4 | 0DF2 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|

ROM15

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| in_00 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0000 | 000F | 001E | 002D | 003C | 004B | 005A | 0069 | 0078 | 0087 | 0096 | 00A5 | 00B4 | 00C3 | 00D2 | 00E1 |
| in_01 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 00F0 | 00FF | 010E | 011D | 012C | 013B | 014A | 0159 | 0168 | 0177 | 0186 | 0195 | 01A4 | 01B3 | 01C2 | 01D1 |
| in_02 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 01E0 | 01EF | 01FE | 020D | 021C | 022B | 023A | 0249 | 0258 | 0267 | 0276 | 0285 | 0294 | 02A3 | 02B2 | 02C1 |
| in_03 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 02D0 | 02DF | 02EE | 02FD | 030C | 031B | 032A | 0339 | 0348 | 0357 | 0366 | 0375 | 0384 | 0393 | 03A2 | 03B1 |
| in_04 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 03C0 | 03CF | 03DE | 03ED | 03FC | 040B | 041A | 0429 | 0438 | 0447 | 0456 | 0465 | 0474 | 0483 | 0492 | 04A1 |
| in_05 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 04B0 | 04BF | 04CE | 04DD | 04EC | 04FB | 050A | 0519 | 0528 | 0537 | 0546 | 0555 | 0564 | 0573 | 0582 | 0591 |
| in_06 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 05A0 | 05AF | 05BE | 05CD | 05DC | 05EB | 05FA | 0609 | 0618 | 0627 | 0636 | 0645 | 0654 | 0663 | 0672 | 0681 |
| in_07 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0690 | 069F | 06AE | 06BD | 06CC | 06DB | 06EA | 06F9 | 0708 | 0717 | 0726 | 0735 | 0744 | 0753 | 0762 | 0771 |
| in_08 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0780 | 078F | 079E | 07AD | 07BC | 07CB | 07DA | 07E9 | 07F8 | 0807 | 0816 | 0825 | 0834 | 0843 | 0852 | 0861 |
| in_09 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0870 | 087F | 088E | 089D | 08AC | 08BB | 08CA | 08D9 | 08E8 | 08F7 | 0906 | 0915 | 0924 | 0933 | 0942 | 0951 |
| in_A | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0960 | 096F | 097E | 098D | 099C | 09AB | 09BA | 09C9 | 09D8 | 09E7 | 09F6 | 0A05 | 0A14 | 0A23 | 0A32 | 0A41 |
| in_B | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0A50 | 0A5F | 0A6E | 0A7D | 0A8C | 0A9B | 0AAa | 0AB9 | 0AC8 | 0AD7 | 0AE6 | 0AF5 | 0B04 | 0B13 | 0B22 | 0B31 |
| in_C | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0B40 | 0B4F | 0B5E | 0B6D | 0B7C | 0B8B | 0B9A | 0BA9 | 0BB8 | 0BC7 | 0BD6 | 0BE5 | 0BF4 | 0C03 | 0C12 | 0C21 |
| in_D | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0C30 | 0C3F | 0C4E | 0C5D | 0C6C | 0C7B | 0C8A | 0C99 | 0CA8 | 0CB7 | 0CC6 | 0CD5 | 0CE4 | 0CF3 | 0D02 | 0D11 |
| in_E | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0D20 | 0D2F | 0D3E | 0D4D | 0D5C | 0D6B | 0D7A | 0D89 | 0D98 | 0DA7 | 0DB6 | 0DC5 | 0DD4 | 0DE3 | 0DF2 | 0E01 |
| in_F | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0E10 | 0E1F | 0E2E | 0E3D | 0E4C | 0E5B | 0E6A | 0E79 | 0E88 | 0E97 | 0EA6 | 0EB5 | 0EC4 | 0ED3 | 0EE2 | 0EF1 |

ANNEXE E

FICIER DE COMMANDE DES SIMULATIONS SUR VIEWLOGIQUE

FICHIER DE COMMANDE DES SIMULATIONS SUR VIEWLOGIC

| DÉFINITIONS DES VECTEURS

vector DATA DATA

vector TH1 TH1

vector TH2 TH2

vector MH MH

| MÉTHODES D’AFFICHAGE DES VECTEURS

Radix dec DATA TH1 TH2 MH

| SIGNAUX À AFFICHER

wave detecteur_estimateur.wfm CLK DATA Pdebut Pvalide Pfin Plargeur

| DÉBUT DE LA SIMULATION

sdisplay

restart

| INITIALISATION DES PARAMÈTRES

assign MH0 1

assign MH1 1

assign TH1 40\D

assign TH2 10\D

| INITIALISATION DE L’HORLOGE

Stepsize 10 ns

Clock CLK 1 0

| SIMULATION

wfm RESET @0ns=1\D

cycle 1

wfm RESET 20ns=0\D

cycle 1

ANNEXE F

FICIER DES SIMULATIONS SUR MATLAB

FICHER DES SIMULATIONS SUR MATLAB

```

clear all;
close all;

% Vecteur de donnees de l'impulsion
Pulse=[12,15,14,72,74,74,73,74,74,73,70,54,18,6,42,35,30,10,10,7,83,85,84,85,85,85,83
,78,33,9,13,9,5,2,7,76,78,78,78,78,78,76,66,15,11,6,31,2,8,7,83,84,84,84,85,85,84,82
,66,9,44,47,44,14,6,11,79,80,80,80,81,80,80,75,47,11,5,5,7,4,4,11,68,75,76,75,76,76,75,
73,64,26,6,39,6,14,14,75,81,82,81,83,82,82,79,69,28,12,14,10,11,10,11,18,83,84,84,84,
85,84,83,79,43,11,0,10,6,9,10,9,6,82,84,84,85,85,84,83,75,26,17,9,17,10,1,14,82,85,85,
85,85,84,82,7,10,8,6,6,6];

Long=length(Pulse);
TH1=40;           % Valeur du premier seuil TH1
TH2=10;           % Valeur du premier seuil TH1
MH=0;             % Parametre du nombre d'echantillons a valider sur le front montant
i=1;n=0;m=0;
while i<= (Long-7)
    X=1;
    while (i<= Long-1)&(Pulse(i)<TH1)
        i=i+1;
    end;
    m=m+1;
    PDebut(m)=i;
    R=Pulse(i:i+MH) >=TH1;
    for j=1:length(R)
        X=X*R(j);
    end;
    if X==1
        n=n+1;
        Val(n)=i;
        while (i<= Long-1)&(Pulse(i)>=TH2)
            i=i+1;
        end;
    end
end

```

```
i=i+1;
end
```

```
ND= m-1
NDval= min(10,n-1)
detectees
Nfa=max(0,ND-10)
NDm=max(0,10-NDval)
```

```
Pd=min(ND,10)/10
Pfa=Nfa/(10+Nfa)
Pm=NDm/10
```

```
% Nombre d'alarmes
% Nombre d'impulsions valides

% Nombre de fausses alarmes
% Nombre d'impulsions manquees

% Probabilite de detections
% Probabilite de fausses alarmes
% Probabilite de detections manquees
```

ANNEXE G

RAPPORTS DES RÉSULTATS DE MISE EN ŒUVRE

RÉSULTATS AU NIVEAU LOGIQUE

Xilinx TRACE, Version
Copyright (c) 1995-1999 Xilinx, Inc. All rights reserved.
Design file: map.nc
Physical constraint file: agc.pcf

Device,speed: xcv600,-5 (PRELIMINARY 1.96 1999-12-21)
Report level: error report

Timing constraint: NET "CLK" PERIOD = 20 nS HIGH 50.000 % ;
8304 items analyzed, 0 timing errors detected.
Minimum period is 7.883ns.

All constraints were met.

Data Sheet report:

All values displayed in nanoseconds (ns)

Timing summary:
Timing errors: 0 Score: 0

Constraints cover 9012 paths, 0 nets, and 3920 connections (89.0% coverage)

Design statistics:
Minimum period: 7.883ns (Maximum frequency: 126.855MHz)

Analysis completed Sun Mar 12 14:20:49 2000